



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JYRKI TIRKKONEN
ENNAKOIVAN KUNNOSSAPITO-OHJELMAN SUUNNITTELU

Diplomityö

Tarkastaja: professori Kalevi Huhtala
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
31. tammikuuta 2018

TIIVISTELMÄ

Jyrki Tirkkonen: Ennakoivan kunnossapito-ohjelman suunnittelu

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 119 sivua, 6 liitesivua

Helmikuu 2018

Automaatiotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Fluid Power Automation

Tarkastaja: professori Kalevi Huhtala

Avainsanat: kunnossapito, kunnonvalvonta, ennakoiva, vikaantuminen

Diplomityön tarkoituksena oli kartoittaa vaihtoehtoja kunnonvalvontamenetelmille, sekä toimia päätöksenteon tukena suunniteltaessa ennakoivaa kunnossapitoa teollisuusyritykselle. Työn lopputuloksena syntyi lista erilaisten komponenttien kunnonvalvontamenetelmistä, sekä esitys mahdollisista kunnonvalvontatoimenpiteistä työn tarkastelun alla olevalle laitteistolle.

Työn teorian taustana käytettiin sekä kunnonvalvontaan liittyvää kirjallisuutta että diplomityön yhteydessä suoritettua kyselytutkimusta. Kyselytutkimus suunnattiin alan parissa työskenteleville ammattilaisille, joiden vastausten pohjalta laadittiin yleisesti ennakoivaa kunnossapitoalaa koskevia johtopäätöksiä.

Diplomityössä käydään läpi myös tyypillisimmät vikaantumistavat, joita voidaan havaita teollisuuslaitteistoissa. Vikaantumistapojen yhteydessä niiden tunnistaminen, mahdollinen estäminen sekä havainnointimenetelmät ovat avattu tarkemmin.

Työn lopputulosta varten tarkasteltavalle laitteistolle suoritettiin komponenttitason riskikartoitusanalyysi, jonka tarkoituksena oli selvittää kriittisimmät komponentit laitteessa. Tämän avulla kunnonvalvontasuunnittelua oli mahdollista keskittää koskettamaan enemmän kriittisiä komponentteja.

Diplomityössä otetaan myös kantaa muiden tuotantolaitteiden kunnon seurattavuuteen, suorittamalla laitetason kriittisyystarkastelu, jonka tuloksista saatiin lista tuotantolaitteista, joiden kunnonvalvontaan olisi syytä kiinnittää tarkempaa huomiota.

ABSTRACT

Jyrki Tirkkonen: Design of the predictive maintenance program
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 119 pages, 6 Appendix pages
February 2018
Master's Degree Programme in Automation Engineering
Major: Fluid Power Automation
Examiner: Professor Kalevi Huhtala

Keywords: maintenance, condition monitoring, predictive, breakdown

The aim of this Master's thesis was to investigate options for condition monitoring and support decision making about predictive maintenance program in industry company. The final results of this thesis includes ways to monitor condition of different industrial components and presentation how to monitor the subject device of this thesis.

The theory behind this thesis is based on the literature about predictive maintenance and on the research that was made for this thesis. The research was made with professionals working on predictive maintenance field. The results of the research were used to make conclusions about the predictive maintenance field generally.

This thesis goes through also the typical breakdown methods that are possible for industrial devices. The chapters about breakdowns also clarifies different ways how to identify, prevent and monitor failures in components.

For the final results of this thesis, the risk assessment of the components in the subject device was made. With the risk assessment results, it was possible to determine the most critical components of the device and centralize the focus of the predictive maintenance to the right place.

The thesis also takes into account about other device's maintenance with the equipment level risk assessment. With the equipment level risk assessment, it was possible to determine which devices should be taken into the predictive maintenance program and how to maintain rest of the devices.

ALKUSANAT

Tämän diplomityön on mahdollistanut suomalaisessa teollisuudessa toimiva moottoreiden elinkaaripalveluita tarjoava yritys. Haluan kiittää yritystä diplomityömahdollisuuden tarjoamisesta sekä tarvittavien puitteiden järjestämisestä.

Tärkeänä osana työtä oli myös kyselytutkimus, jonka perusteella oli mahdollista rakentaa pohjaa työn tuloksille. Teknologia 17- messut mahdollistivat tarvittavan aineiston keräämisen kyselytutkimukseen sekä tarjosivat huomattavan määrän uusia näkökulmia tarkastella aihetta.

Diplomityön valmistuminen sujui suunniteltua aikataulua nopeammin, josta haluan kiittää kaikkia työn edistymiseen liittyneitä henkilöitä. Erityiskiitokset ansaitsevat H. Salminen, joka toimi työn ohjaajana yrityksessä, sekä E. Tevaniemi, joka auttoi työn toteuttamisessa ja ideoimisessa. Lisäksi TTY:n puolelta haluan kiittää prof. Kalevi Huhtalaa työn tarkastamisesta.

Tampereella, 2.2.2018

Jyrki Tirkkonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	KUNNONVALVONTA TEOLLISUUDESSA	2
2.1	Kunnossapidon kustannukset	3
2.2	Kunnossapidon suunnittelu	5
2.3	Teollisuuden ennakoiva kunnossapito – kyselytutkimus	7
2.3.1	Osio 1: Yleisosio	8
2.3.2	Osio 2: Kunnossapidon tärkeysjärjestys	15
2.3.3	Osio 3: Kunnossapidon mittausteknillisiä asioita	20
2.3.4	Osio 4: Vapaa sana	23
2.3.5	Tutkimuksen johtopäätökset	26
3.	TARKASTELTAVAN LAITTEISTON ESITTELY	28
3.1	Hydrauliikkajärjestelmät	29
3.1.1	Matalapainejärjestelmä	30
3.1.2	Korkeapainejärjestelmä	31
3.1.3	Valumajärjestelmä	31
3.1.4	Jäähdytysjärjestelmä	32
3.2	Voitelujärjestelmä	32
3.3	Sähköjärjestelmä	32
3.4	Hammaspyörävaihteisto	33
4.	VIKATILANTEIDEN TEORIA	34
4.1	Mekaaniset viat	36
4.1.1	P-F-käyrä	36
4.1.2	Kulumismekanismit	38
4.1.3	Laakereiden vikaantuminen	40
4.1.4	Laakerivaurion tunnistaminen	42
4.1.5	Erilaisten tekijöiden vaikutus laakerin elinikään	48
4.2	Hydrauliikkajärjestelmän viat	54
4.2.1	Hydrauliikkaneste ja sen luokittelu	56
4.2.2	Hydrauliikkanesteen ongelmat laitteistossa	59
4.2.3	Hydraulipumpun ongelmat laitteistossa	60
4.2.4	Venttiileiden ja antureiden ongelmat laitteistossa	62
4.3	Pneumaattiset viat	64
4.4	Sähköiset ja ohjelmalliset viat	66
4.4.1	Oikosulkumoottorit	68
4.4.2	Taajuusmuuttajat	85
4.4.3	Ohjelmistot	86
5.	KUNNONSEURANTAAN TYÖKALUJA/ MITTALAITTEITA	88
5.1	Värähtelymittaus	88
5.1.1	Siirtymän mittaus	89
5.1.2	Nopeuden mittaus	90

5.1.3	Kiihtyvyyden mittaus.....	90
5.1.4	Värähtelymittausten tulevaisuus	91
5.1.5	Värähtelymittausten vaikutus yritykselle.....	91
5.2	Sähkötekniset mittaukset.....	92
5.3	Hydrauliikkanesteanalyysi	93
5.3.1	Hydrauliikkanesteen jatkuva valvonta	94
5.4	Käyttäjäpohjainen vikatilaseuranta ja aistinvaraiset mittaukset.....	95
5.5	Suorituskykymittaukset	95
5.6	Lämpötilamittaukset.....	97
5.6.1	Koskettavat lämpötilamittaukset.....	98
5.6.2	Koskemattomat lämpötilamittaukset.....	99
6.	KUNNONVALVONTAMENETELMIEN VALINTA	101
6.1	Hydraulipumppujen valvonta.....	101
6.2	Sähkömoottoreiden valvonta.....	102
6.3	Antureiden ja venttiilien valvonta	103
6.4	Vaihteiston valvonta.....	103
6.5	Hydrauliikkanesteen ja voiteluöljyn valvonta.....	103
6.6	Kunnonvalvonnan jatkokehittäminen	104
6.7	Muiden laitteiden liittäminen kunnonvalvonnan piiriin.....	105
6.8	Kunnonvalvonnan suorittaminen ja kustannukset.....	106
6.8.1	Laiteinvestoinnit.....	107
6.8.2	Ajallinen investointi.....	108
6.8.3	Kunnonvalvonnan investointien vaikutus yritykselle	108
6.8.4	Kunnonvalvonnan käytännön suorittaminen	109
7.	YHTEENVETO	111
	LÄHTEET	114

LIITE A: VIERINTÄLAAKERIN VAURIOITUMISTAULUKKO

LIITE B: ISO 3448 VG- LUOKITTELU [21, S. 13]

LIITE C: ISO 2372 – VÄRÄHTELYLUOKITUKSET [37]

LIITE D: PINTOJEN EMISSIIVISYYSKERTOIMIA [53]

LIITE E: ÖLJYANALYYSI FLUIDLAB [57]

LIITE F: LAITETASON KRIITTISYYSTARKASTELUTAULUKKO

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. SFS-EN 13306 mukainen kunnossapidon jaottelu [1, s. 98]</i>	<i>2</i>
<i>Kuva 2. Teollisuuden kunnossapidon kustannusten jakautuminen 2007 [1, s. 40]</i>	<i>4</i>
<i>Kuva 3. Kunnossapidon kustannukset suhteessa käytettyyn aikaan [3, s. 25]</i>	<i>5</i>
<i>Kuva 4. Kunnossapidon tarpeellisuus</i>	<i>8</i>
<i>Kuva 5. Kunnossapidon kannattavuus ajan käytön suhteen</i>	<i>9</i>
<i>Kuva 6. Kunnossapidon kannattavuus rahan käytön suhteen</i>	<i>9</i>
<i>Kuva 7. Kunnossapidon kannattavuus henkilöresurssien käytön suhteen</i>	<i>10</i>
<i>Kuva 8. Sähköisten anturimittausten tärkeys</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 9. Tuotantolaitteiden kartoituksen merkitys</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 10. Tuotantolaitteiden tuntemisen merkitys</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 11. Henkilön vaikutus kunnossapitomittauksiin</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 12. Yrityksen oman kunnossapito henkilön tärkeys</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 13. Esimiesten tärkeys kunnossapidon osalta</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 14. Tuotantotyöntekijöiden tärkeys kunnossapidon osalta</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 15. Vastuujaottelu yrityksessä kunnossapidon osalta</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 16. Oikosulkumoottorin kunnonseurannan tärkeimmät työkalut</i>	<i>15</i>
<i>Kuva 17. Vaihteiston kunnonseurannan tärkeimmät työkalut</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 18. Hydraulipumpun kunnonseurannan tärkeimmät työkalut</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 19. Hydraulinesteen kunnonseurannan tärkeimmät työkalut</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 20. Tärkeimmät seurattavat komponentit</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 21. Kunnonvalvontamittausten tärkeimmät tekijät</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 22. Kunnonvalvontamittausten välinen aika</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 23. Kunnonvalvontaan tärkeimmät työkalut</i>	<i>21</i>
<i>Kuva 24. Kunnossapidon tavoite</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 25. Kunnossapitoon sijoitetun euron suhde säästettyyn euroon</i>	<i>23</i>
<i>Kuva 26. Tyypillinen laitteiston vikaantumiskäyrä ”ammekäyrä” [5]</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 27. Teoreettinen P-F-käyrä vierintälaakerille</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 28. Kulumismekanismit eri tilanteiden mukaan [6, s. 6]</i>	<i>39</i>
<i>Kuva 29. Vierintälaakereiden vaurioitumiseen johtaneet syyt [9, s. 11]</i>	<i>43</i>
<i>Kuva 30. Laakerin sisäkehän väsymisvaurio [9, s. 28]</i>	<i>44</i>
<i>Kuva 31. Laakerin ulkokehällä näkyvä väsymisvaurio [9, s. 28]</i>	<i>44</i>
<i>Kuva 32. Vierintälaakereiden rullissa kulumisen voi näkyä naarmuina [9, s. 42]</i>	<i>45</i>
<i>Kuva 33. Korroosion aiheuttamat ongelmat ovat helposti havaittavissa värin perusteella [11, s. 129]</i>	<i>46</i>
<i>Kuva 34. Sähköeroosion aiheuttamaa ”pyykkilautakuviota” laakerin ulkokehällä [9, s. 38]</i>	<i>47</i>
<i>Kuva 35. Ylijännitteen aiheuttamaa kraateroitumista rullalaakerin rullassa [11, s. 131]</i>	<i>47</i>
<i>Kuva 36. Laakerin asennuksessa tapahtunut plastinen muodonmuutos [11, s. 132]</i>	<i>48</i>
<i>Kuva 37. Laakerin sisäkehässä oleva aksiaalinen halkeama [9, s. 40]</i>	<i>48</i>

Kuva 38. Toimintalämpötilan vaikutus laakerin käyttöikään	51
Kuva 39. Todellisen toimintalämpötilan vaikutus laakerin elinikään	52
Kuva 40. Kierrosnopeuden vaikutus laakerin käyttöikään	53
Kuva 41. Voiteluaineen puhtauden merkitys laakerin elinikään	54
Kuva 42. Synteettisen ja mineraaliöljyjen molekyylikokojen ero [22]	55
Kuva 43. Eri beta-arvojen vertaaminen suodattimissa [23].....	58
Kuva 44. Hydrauliiikkapumpulle tyypillisten häviöiden muodostuminen [27]	61
Kuva 45. Turbiinianturin tyypillinen käyttäytymiskuvaaja [28, s. 96]	63
Kuva 46. Ilmaan sitoutuneen veden määrän riippuvuus lämpötilasta [29]	65
Kuva 47. Paperitehtaan sähköjärjestelmän vikaantumiskohteita [14, s. 16]	67
Kuva 48. Oikosulkumoottorin vikojen jakaantuminen osioittain [14, s. 25]	68
Kuva 49. Oikosulkumoottorin vikaantumiseen johtaneet syyt [14, s. 25].....	69
Kuva 50. Oikosulkumoottorin D-pään laakerin lämpökamerakuvaus [34].....	71
Kuva 51. Lämpökamerakuva sähkömoottorin viallisia käämeistä [35, s. 18]	71
Kuva 52. Sähkömoottorille tehtävä aksiaalivuomittauksen asetelma [36, s. 21]	72
Kuva 53. Viallisia roottorisauvoja sisältävän oikosulkumoottorin aksiaalivuospektri [36, s. 89]	73
Kuva 54. Taajuusmuuttajaohjatun ehjän oikosulkumoottorin aksiaalivuospektri [36, s. 70]	73
Kuva 55. Suureiden herkkyys värähtelytaajuuteen [39, s. 21]	74
Kuva 56. SPM:n avulla havaittu laakerivaurio rummussa [41, s. 10]	75
Kuva 57. Ulkokehävaurioisen laakerin verhoikäyräanalyysi [40, s. 16].....	77
Kuva 58. Ehjän laakerin verhoikäyräanalyysi [40, s. 16]	77
Kuva 59. Värähtelymittausanturin kiinnityskohdat [38, s. 53]	79
Kuva 60. Staattorivirtaspektri viallisia roottorisauvoja sisältävästä oikosulkumoottorista [39, s. 90].....	81
Kuva 61. Staattorivirtaspektri ehjästä oikosulkumoottorista [36, s. 92]	81
Kuva 62. Jännite-epäsymmetrian vaikutus oikosulkumoottorin kuormitettavuuteen [13, s. 38]	82
Kuva 63. Taajuusmuuttajan yksinkertaistettu piirikaavio [42, s. 382].....	83
Kuva 64. Tyypillisen kolmivaiheisen PWM-ohjatun taajuusmuuttajan jännitteet [12, s. 8]	83
Kuva 65. Taajuusmuuttajan ulostulevan virran riippuvuus lämpötilasta [43, s. 53].....	86
Kuva 66. Ohjelmistovikojen tyypillinen kehittyminen suhteessa aikaan [4, s. 65]	87
Kuva 67. Siirtymän avulla piirretty akselin ratakäyrä liukulaakerissa [1, s. 236]	89
Kuva 68. Näytteenottohanojen sijoittaminen oikein putkeen [20, s. 4]	93
Kuva 69. Näytteenottohanojen sijoitus sivuvirtapiirissä [20, s. 5].....	94
Kuva 70. Pumpun vuotovirtauksen mittaaminen	96
Kuva 71. Wheatstonen-siltaan kytketty PT-100 lämpötila-anturi.....	98
Kuva 72. Kuvauskulman vaikutus emissiivisyyteen [52, s. 39]	100
Kuva 73. Hydrauliiikkapumpun volumetrinen hyötysuhteen määrittäminen [55, s. 12].....	102

<i>Kuva 74. Ennakoivan kunnossapito-ohjelman päävaiheet</i>	<i>112</i>
---	------------

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet ja käsitteet

AC	engl. Alternative Current, vaihtovirta/ -jännite
Closed-loop Control	engl. Suljettu säätöjärjestelmä
DC	engl. Direct Current, tasavirta/ -jännite
DIN	saks. Deutsches Institut für Normung, saksalainen standardisointiorganisaatio
dU/dt	Jännitteen nousunopeus
FFT	engl. Fast Fourier Transform, signaalin taajuusmuunnos
IEC	engl. International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähkötekniikan standardisointijärjestö
IGBT	engl. Insulated-Gate Bipolar Transistor, elektroninen kytkin
IIoT	engl. The Industrial Internet of Things, teollisuuden laitteet yhdistävä verkko
ISO	engl. International Organization for Standardization, kansainvälinen standardisointijärjestö
MEMS	engl. Micro Electro Mechanical Systems, mikrosysteemi
MTBF	engl. Mean Time Between Failures, keskimääräinen vikaantumisväli
MTTF	engl. Mean Time to Failure, keskimääräinen vikaantumisaika
P-F	engl. Point to Failure, aika täydelliseen rikkoutumiseen
PSK	Prosessiteollisuuden Standardisoimiskerho, teollisuuden ja siihen liittyvien yritysten kehitysyksikkö
PWM	engl. Pulse Width Modulation, pulssileveysmodulaatio
QR-koodi	engl. Quick Response, ruutukoodi
RMS	engl. Root Mean Square, tehollisarvo
SAE	engl. Society of Automotive Engineers, autoalan standardisointijärjestö
SFS	Suomen standardisoimisliitto SFS ry, standardisoinnin keskusjärjestö Suomessa
SPM	engl. Shock Pulse Method, iskusysäysmenetelmä
VG	engl. Viscosity Grade, viskositeettiluokittelu
Wheatstonen-silta	Sähkötekniikan vastusten kytkentämalli

Symbolit

a_1	Käyttöiän säätökerroin [-]
a_{SKF}	SKF:n käyttöikäkerroin [-]
C	Dynaaminen kantavuusluku [kN]

d	Vierintäelementin halkaisija [mm]
D	Vierintäuran keskihalkaisija [mm]
D_p	Vaihteiston rataan halkaisija [mm]
f_a	Akselin pyörintänopeus [1/s]
f_b	Vierintäelementin vaurioiden esiintymistaajuus [1/s]
f_c	Vierintäelementin häkin vaurioiden esiintymistaajuus [1/s]
f_i	Sisäkehävaurion esiintymistaajuus [1/s]
f_o	Ulkokehävaurion esiintymistaajuus [1/s]
f_r	Roottorivikojen esiintymistaajuus [1/s]
f_s	Syöttötaajuus/ synkroninen taajuus [1/s]
f_w	Kuormituskerroin 1,2 [-]
H	Vaihteistolle välittyvä teho [kW]
K	Todellinen akselin kuormitus [N]
K_c	Laskettu teoreettinen kuormitusarvo [N]
K_i	Kriittisyysarvo/ -indeksi [-]
K_{ka}	Painotuskerroin käyttöasteelle [-]
K_{ko}	Painotuskerroin keskimääräisille korjauskustannuksille [-]
K_{la}	Painotuskerroin laatukustannuksille [-]
K_t	Tangentiaalinen kuormitus vaihteelle [N]
K_{tm}	Painotuskerroin tuotannon menetykselle [-]
K_{tu}	Painotuskerroin turvallisuusriskeille [-]
K_{vv}	Painotuskerroin vikaantumisvälille [-]
K_{ym}	Painotuskerroin ympäristöriskeille [-]
L_{10}	Laakerin suunniteltu kestoikä, jonka noin 90% saavuttaa [rev*1e6]
L_{nm}	SKF:n laskema laakerin kestoikä [rev*1e6]
n	Pyörintänopeus [rpm]
N	Vierintäelementtien määrä [kpl]
P	Ekvivalenttikuormitus [kN]
p	Kestoikäkaavan eksponentti, 10/3 rulla-/ 3 kuulalaakerilla [-]
Q	Tilavuusvirtaus [L/min]
s	Jättämä [-]
x	Partikkelin koko [μm]
\bar{x}	Keskiarvo [-]
α	Vierintäelementin kosketuskulma [$^\circ$]
β	Suodatusaste [-]
η	Dynaaminen viskositeetti [Pa*s]
η_{vol}	Volumetrinen hyötysuhde [-]
ρ	Tiheys [kg/m^3]

σ

Keskihajonta [-]

ν

Kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]

1. JOHDANTO

Teollisuuden kasvavien vaatimuksien myötä tuotantolaitteilta odotetaan jatkuvasti enemmän. Niiden käyttökapasiteetin halutaan kasvavan ja tuotantomäärien lisääntyvän. Tämä johtaa tuotantolaitteille kohdistuvien rasitusten kasvamiseen, sekä laiterikosta johtuvien seisakkien kustannusten kasvuun. Jotta haluttuihin tavoitteisiin päästäisiin, on laitteiden toimintakunnosta oltava mahdollisimman hyvin perillä.

Automaatioasteen ja digitalisoitumisen kasvamisen myötä erilaiset sähköiset anturimittaukset ovat tulleet kunnossapitohenkilöiden avuksi kunnonvalvontatöissä. Anturimittauksilla on mahdollista selvittää objektiivisesti laitteiden toimintakunto, sekä havainnoida jo hyvissä ajoin tulevia vikaantumisia. Oikeita suuria mittaamalla ja oikein kohdistetuilla mittauksilla voidaan parantaa laitteiden toimintakykyä ja minimoida laiterikoista johtuvia kustannuksia.

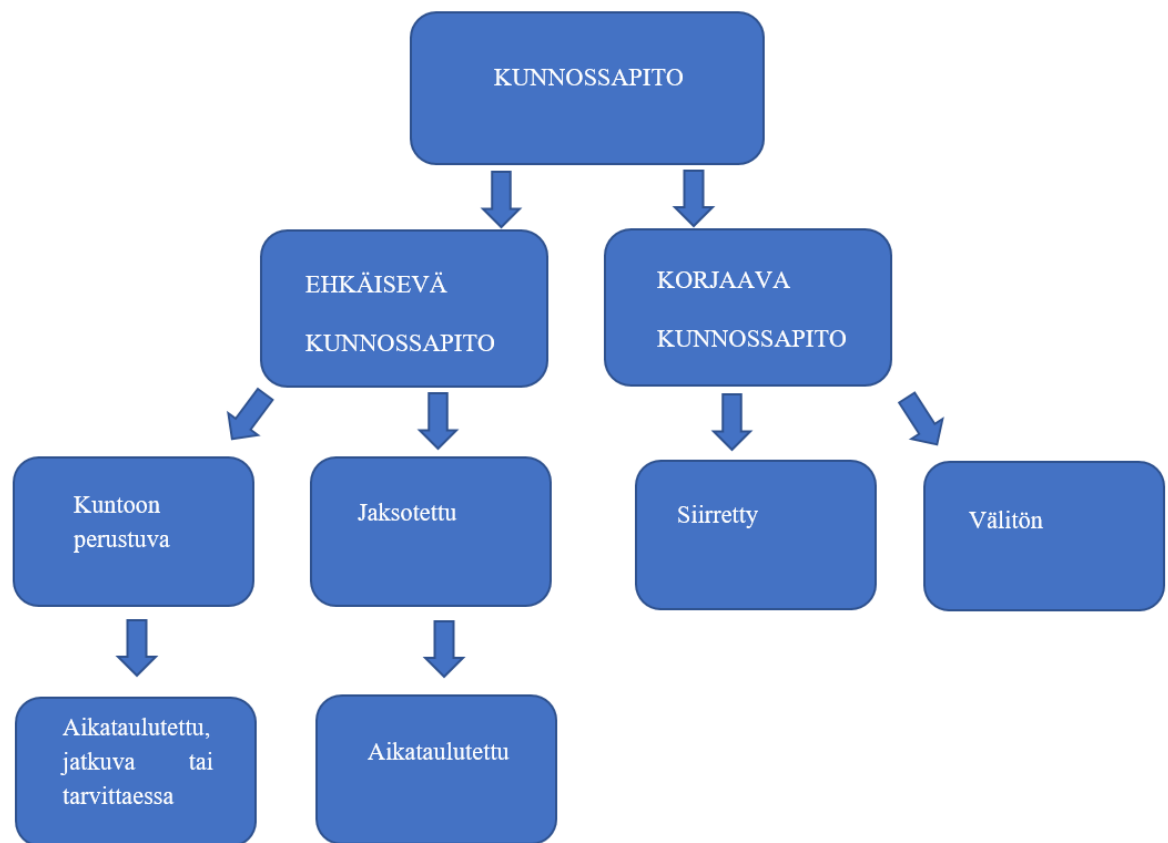
Tässä diplomityössä käydään läpi teollisuuden kunnossapitoa yleisesti muun muassa kyselytutkimuksen kautta saatujen tulosten avulla. Työssä perehdytään myös tyypillisimpien vikojen juurisyiden selvittämiseen esimerkkien ja kuvien avulla. Lisäksi yleisimpien teollisuudessa esiintyvien komponenttien vikaantumistyyppejä sekä niiden estämiseen ja havaitsemiseen käytettäviä keinoja on käyty läpi. Kunnonvalvontaan liittyviä työkaluja ja menetelmiä on tarkasteltu siinä määrin, kuin niiden käyttämiseen ja valitsemiseen tarvitaan tietoa.

Diplomityön tarkoituksena on kartoittaa vaihtoehtoja kunnonvalvontaa varten sekä löytää käyttökelpoinen ratkaisu tarkasteltavan laitteiston kunnan seuraamiselle. Työ on tarkoitettu toimimaan päätöksenteon tukena suunniteltaessa yrityksen kunnonvalvontaa. Diplomityön lopussa on käyty läpi mahdollisia ratkaisuja eri komponenttien valvontaa varten, sekä esitetty mahdollisia kehityssuuntia kunnonvalvonnalle tulevaisuutta ajatellen. Työ on tehty silmällä pitäen tiettyä teollisuudessa olevaa useasta eri järjestelmästä koostuvaa laitteistoa, mutta asiat ovat käsitelty niin, että niiden yleistäminen muualle teollisuuteen ja laitteistoihin on mahdollista.

2. KUNNONVALVONTA TEOLLISUUDESSA

Kunnossapidon tarkoituksena on varmistaa, että yrityksen laitteet ja järjestelmät pysyvät toimintakunnossa tai niiden vikaantuessa, ne korjataan tavanomaiseen toimintakuntoon. Kunnossapitoon voidaan sisällyttää myös varsinaisen suorittamisen lisäksi myös kaikki näitä koskevat hallinnolliset toimenpiteet [1, s. 26].

Kunnossapito voidaan jakaa standardin SFS-EN 13306 mukaan kahteen alalajiin. Jakaminen perustuu vian havaitsemisen ajankohdan mukaan ja siihen kohdistuvien toimenpiteiden perusteella. Alla oleva Kuva 1 esittää standardin mukaisen jaottelun



Kuva 1. SFS-EN 13306 mukainen kunnossapidon jaottelu [1, s. 98]

Kuvan mukainen karkeajaottelu ehkäisevään tai korjaavaan kunnossapitoon tapahtuu kunnossapidon aikatauluttamisen ja suorittamisen mukaan. Mikäli kunnossapito tapahtuu vain, kun vikatiloja ilmenee, se luokitellaan korjaavaan kunnossapitoon. Kun laitteiston tilaa pyritään mittaamaan tai huollot on aikataulutettu säännöllisiksi, voidaan puhua ehkäisevästä kunnossapidosta.

Tämän hetkinen trendi teollisuudessa on panostaa entistä enemmän kuntoon perustuvaan ja sitä kautta ehkäisevään kunnossapitoon. Tämä näkyy rahallisena ja ajallisena panostuksena laitteistojen tarkempana kartoittamisena sekä niiden järjestelmällisenä kunnan mittaamisena. Laitteiden kunnan seuraamisella pyritään kasvattamaan tuottavuutta, suunnittelemaan paremmin ajankäyttöä, niin kunnossapidon kuin seisakkien osalta, sekä pidentämään koneiden ja laitteiden elinikää [38, s. 11-12].

Digitalisoitumisen myötä mittaaminen on tullut entistä tärkeämmäksi osaksi kunnanvalvontaa. Antureiden ja järjestelmien monipuolistuessa ja niiden hintojen alentuessa, yhä enemmän on aloitettu panostamaan sähköisiin anturimittauksiin. Syitä miksi tähän suuntaan ollaan menossa ovat muun muassa [38, s. 13]:

- Laitteille ei ole olemassa varakoneita, joten koneen kunto on yhä kriittisempää
- Tuotantomäärät ovat nousseet, joten seisakkien suhteellinen hinta on noussut
- Koneet ja laitteet ovat muuttuneet yhä nopeakäyntisimmiksi ja materiaaleiltaan kevyemmiksi, joten vikaantumiset tapahtuvat nopeammin
- Huoltohenkilökunnan määrä on vähentynyt, joten tarvitaan enemmän dataa, jotta huoltoja voidaan kohdentaa oikein
- Anturimittaukset ovat objektiivisia, joten saadaan yhä luotettavampia ja helpommin kirjattavia todisteita koneiden kunnosta

Tulevaisuudessa voidaan olettaa, että yritysten omien kunnossapitohenkilöiden määrä vähenee johtuen kunnanvalvonnan digitalisoitumisesta. Tuotantolaitteiden kuntoa voidaan seurata jatkossa etäyhteyden välityksellä, eikä tarvetta ihmisen paikan päällä tekemille mittauksille ole yhtä suurta tarvetta kuin aiemmin. IIoT (Industrial Internet of Things) myötä tieto laitteiden tämän hetkisestä tilasta saadaan pilvipalvelun kautta kunnossapitovastaavan käyttöön. Tästä datasta saadaan jatkuva-aikaista tietoa siitä missä kunnossa ja minkälaisessa käytössä laitteisto on. Tämän myötä on mahdollista optimoida paremmin laitteen käyttöä sen energiatehokkuuden kuin myös käyttöiän kannalta [44, s. 16-17].

Lisääntyvän automaation myötä myös laitteiden paikallinen älykkyys tulee kasvamaan. Laitteet itse valvovat omaa tilaansa ja antavat häiriösignaaleja, mikäli jotain poikkeavaa havaitaan. Lisäksi ne voivat tarvittaessa itse muuttaa toimintatilaansa sellaiseksi, että vikatila ei pääse kasvamaan tai se ohitetaan kokonaan [44, s. 18]

2.1 Kunnossapidon kustannukset

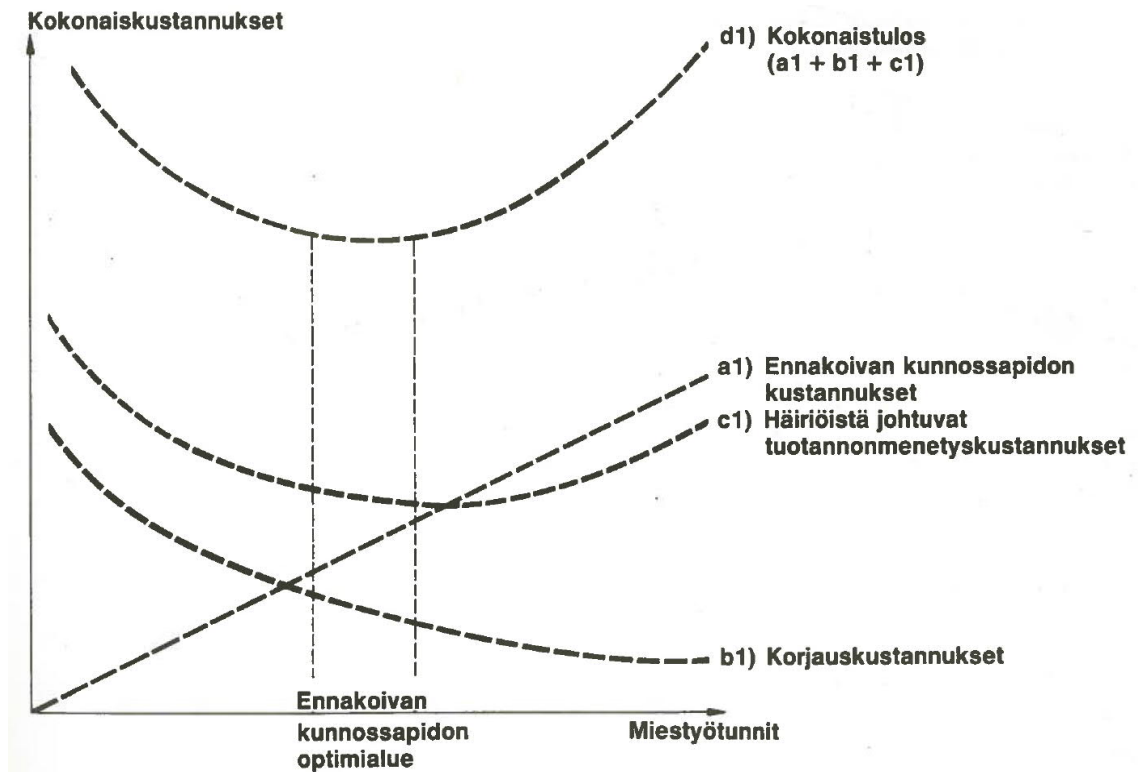
Suuremmissa teollisuusyrityksissä kunnossapito on siirtymässä yhä enemmän ulkopuolisille toimijoille ulkoistuksien myötä. Tämä on johtanut kasvuun teollisuuden kunnanvalvonnan palveluyrityksissä. Karkea jaottelu teollisuudessa syntyvien kunnossapitokustannusten välillä voidaan tehdä alla olevan kuvan (Kuva 2) mukaisesti.



Kuva 2. Teollisuuden kunnossapidon kustannusten jakautuminen 2007 [1, s. 40]

Kuvasta nähdään, että oman työn ja ostettujen palveluiden osuus on ollut lähes yhtä suurta vuonna 2007. Tällä hetkellä se on todennäköisesti jo muuttunut niin, että ostettujen palveluiden osuus on suurin kunnossapidon kustannus. Oletamus pohjautuu tietoon siitä, että ulkopuolisten alihankkijoiden määrä on kasvanut lineaarisesti vuosi vuodelta [4, s. 13].

Ajateltaessa kunnossapidon kustannuskehitystä sijoitettuun aikaan nähden, voidaan kehittyvistä kustannuksista piirtää alla olevan kuvan (Kuva 3) mukainen käyrä.



Kuva 3. Kunnossapidon kustannukset suhteessa käytettyyn aikaan [3, s. 25]

Yllä olevasta kuvasta voidaan havaita, että saavutettu yrityksen tulos ei parane, vaikka kunnossapitoon sijoitettaisiin enemmän aikaa. Tietyn pisteen jälkeen kunnossapitoon sijoitettu aika ei tuota enää rahallisesti yritykselle, vaan sen voidaan kokea lisäävän kustannuksia. Tästä syystä on tärkeää, että tuotantolaitteiden kunnossapito suunnitellaan järkevästi niin, että ylilyöntejä ei tapahdu, mutta riittävät toimenpiteet suoritetaan.

2.2 Kunnossapidon suunnittelu

Suunniteltaessa kunnossapitoa on tärkeää käydä heti alkuun läpi, millaisia tavoitteita halutaan saavuttaa kunnossapidolla. Tavoitteiden asettamisessa joudutaan usein tekemään kompromisseja eri osa-alueiden välillä, kuten investointien ja käyttövarmuuden välillä. Erilaisia näkökulmia, joita olisi syytä ottaa huomioon, asetettaessa tavoitteita voivat olla muun muassa:

- Pitkän ja lyhyen aikavälin tavoitteet
- Tuotannon ja kunnossapidon tavoitteet
- Omat ja yhteistyökumppaneiden tavoitteet

Tärkeintä on tehdä sellainen kompromissi, jolla saavutetaan mahdollisimman hyvä hallinta koneista ja laitteista, sekä kunnossapitoa on realistista suorittaa käytettävillä resursseilla [1, s. 142-145].

Eräs lähtökohta kunnossapidon suunnittelulle on kartoittaa riskianalyysin avulla mahdolliset tuotannolle kriittiset komponentit. Tämän avulla voidaan kohdentaa kunnossapitoa ja mahdollista valvontaa enemmän sille osa-alueelle, joka on tärkeässä asemassa tuotantoa ajatellen. Erilaisten riskianalyysien tekoon on olemassa monia tapoja, eräs standardisoitu keino esitellään standardissa PSK 6800. Siinä pyritään pisteyttämään erilaisten kriittisyystekijöiden avulla laitteiden vaikutus tuotantoon [1, s. 148].

Standardin PSK 6800 riskianalyysissä otetaan huomioon laitteita tarkasteltaessa seuraavia tekijöitä:

- Vikaantumisväli
- Vikaantumisen turvallisuus-/ ympäristövaikutukset
- Tuotannon menetykset vikatilanteessa
- Vikaantumisen aiheuttavat tuotteen laatukustannukset
- Vikojen korjaus ja seurantakustannukset

Kaikki nämä kohdat pisteytetään painotetusti ja lopputuloksesta selviää laitteen kriittisyys tuotannolle, sekä sen seurattavuuden kannattavuus [1, s. 148-151].

Alla oleva Taulukko 1 antaa yhden esimerkin kunnonvalvonnan suunnittelutyökaluksi. Taulukossa tarkastellaan laitteen tuottavuuden ja sen käyttöasteen suhteen vaikutusta kunnonvalvontaan.

Taulukko 1. Laitteen tuottavuuden ja käyttöasteen vaikutus kunnonvalvontaan

Laitteen kannattavuus/ tuottavuus	Matala	<ul style="list-style-type: none"> • Ei tarvetta merkittäväällä seurannalle/ kunnossapidolle 	<ul style="list-style-type: none"> • Paljon suunniteltua ja ehkäisevää kunnossapitoa • Vähäisesti kunnonvalvontaan liittyvää mittaamista
	Korkea	<ul style="list-style-type: none"> • Häiriökorjauksia • Vähäisesti suunniteltua kunnossapitoa • Vähäisesti kunnonvalvontaan liittyvää mittaamista 	<ul style="list-style-type: none"> • Paljon suunniteltua ja ehkäisevää kunnossapitoa • Paljon parantavaa kuntoon perustuvaa kunnossapitoa • Hyvin paljon kunnonvalvontaan liittyviä mittauksia
		Matala	Korkea
Käyttöaste			

Yllä oleva Taulukko 1 on karkea esimerkki kunnonvalvonnan jakautumisesta tuottavuuden ja käyttöasteen mukaan. Taulukosta voidaan huomata, että tuottavuuden ja käyttöasteen ollessa korkea on järkevää kohdentaa kunnonvalvontaa ja siihen liittyviä mittauksia laitteelle. Käyttöasteen ollessa matala, kunnonvalvonta perustuu enemmän häiriökorjauksiin. Käyttöasteen noustessa suoritetaan vastaavasti enemmän suunniteltua kunnossapitoa. Sama logiikka pätee myös laitteen tuottavuuden kohdalla. Mikäli laitteen tuottavuus on korkea, sen kunnossapitoon on syytä kiinnittää enemmän huomiota. Kuitenkin voidaan huomata, että kunnossapidon suunnitelmallisuus on enemmän riippuvainen laitteen käyttöasteesta.

Kunnonvalvonnan mittaamisen edellytyksenä on, että tuotantolaitteet on kartoitettu sille tasolle, että niiden perustoiminta ja kriittisimmät komponentit ovat tiedossa. Tällöin on mahdollista löytää oikeat tavat havainnoida laitteiden kuntoa. Oikeilla tavoilla tarkoitetaan järkevien mittasuureiden löytämistä, mittadatan oikeanlaista tulkintaa sekä sopivan aikavälin järjestämistä mittausten välille [1, s. 162].

Mittasuureiden löytämisen edellytyksenä on perustiedot mahdollisista vikaantumismahdollisuuksista. Tästä syystä on tärkeää tiedostaa, millä tavoin laitteet voivat kulua ja vikaantua. Vikaantumisen tapahtuessa oikean juurisyyn löytäminen edesauttaa varautumista seuraavaan käyttökatkoon sekä parantaa mahdollisuuksia laitteen käyttöä nostamiselle [1, s. 163].

2.3 Teollisuuden ennakoiva kunnossapito – kyselytutkimus

Osana diplomityötä suoritettiin kyselytutkimus, jonka avulla kartoitettiin tämän hetkistä tilannetta liittyen teollisuuden ennakoivaan kunnossapitoon. Kysely suunnattiin alan parissa työskenteleville ammattilaisille ja heidän mielipiteidensä avulla saatiin tietoa alaan liittyvistä asenteista ja mittausmenetelmistä.

Kysely koostui neljästä eri osiosta, joista jokainen keskittyi tarkastelemaan ennakoivaa kunnossapitoa hieman eri kantilta. Ensimmäinen osio keskittyi yleisesti kunnossapitoon liittyviin asenteisiin ja arvoihin. Toisessa osiossa käytiin läpi kunnossapidon mittaamiseen liittyviä asioita ja järjesteltiin niitä tärkeysjärjestykseen. Kolmas osio liittyi kunnossapidon mittaamiseen sekä käytännön mittausteknillisiin asioihin ja viimeisessä osiossa vastaajalla oli mahdollisuus vastata sanallisesti esitettyihin kysymyksiin.

Tutkimus järjestettiin internet-pohjaisena kyselynä, jossa vastaaja vastasi annettuihin kysymyksiin ”rasti ruutuun” -periaatteella. Tavoiteltu tutkimusryhmän koko oli 10-15 henkilöä, lopullisen osallistujamäärän ollessa 11 henkilöä. Toteutuksen ajankohtana oli lokakuun 2017 ensimmäiset kolme viikkoa.

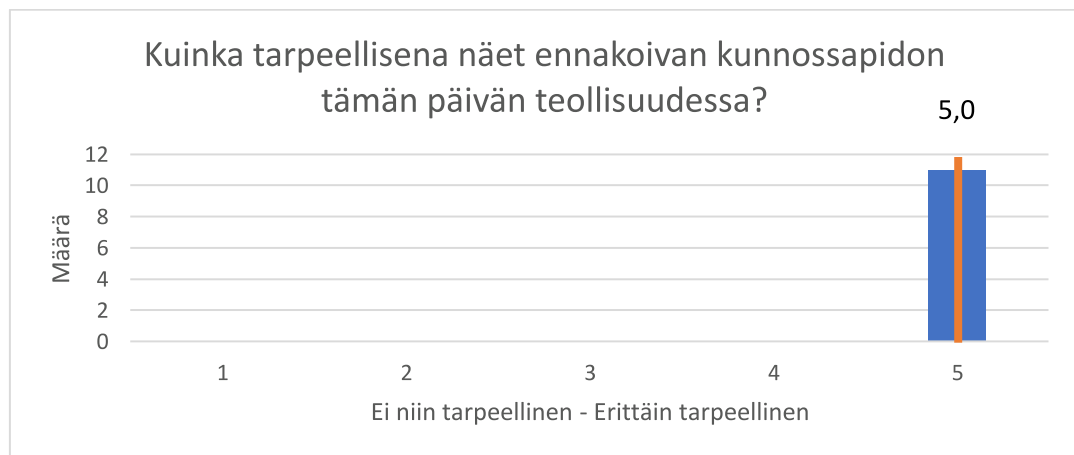
Koska kyselyssä tarkasteltiin vastaajien henkilökohtaisia mielipiteitä ja tutkimusryhmän koko oli pieni verrattuna koko alaan, ei tuloksille ole laskettu virhemarginaalia. Tästä

syystä kovin pitkälle meneviä ja tarkkoja johtopäätöksiä ei ole syytä tehdä tutkimuksen perusteella. Alla on käyty läpi kyselyn tulokset, sekä analysoitu hieman saatuja tuloksia.

2.3.1 Osio 1: Yleisosio

Tässä osiossa käytiin läpi alalla vallitsevia asenteita kysymyksillä, joiden vastausvaihtoehdot olivat 1-5. Vastausvaihtoehdot vaihtelivat kysymyksittäin, mutta pääosin vastaus 5 merkitsi suurta tärkeyttä ja vastaus 1 ei niin tärkeää merkitystä alalle. Viimeisenä kysymyksenä oli vielä vastuujaoittelu työntekijöiden välillä, missä vastausvaihtoehdoilla pyrittiin kuvaamaan vastuunjakoa yrityksen sisällä. Oranssilla pylväällä on kuvattu vastausten keskiarvoa.

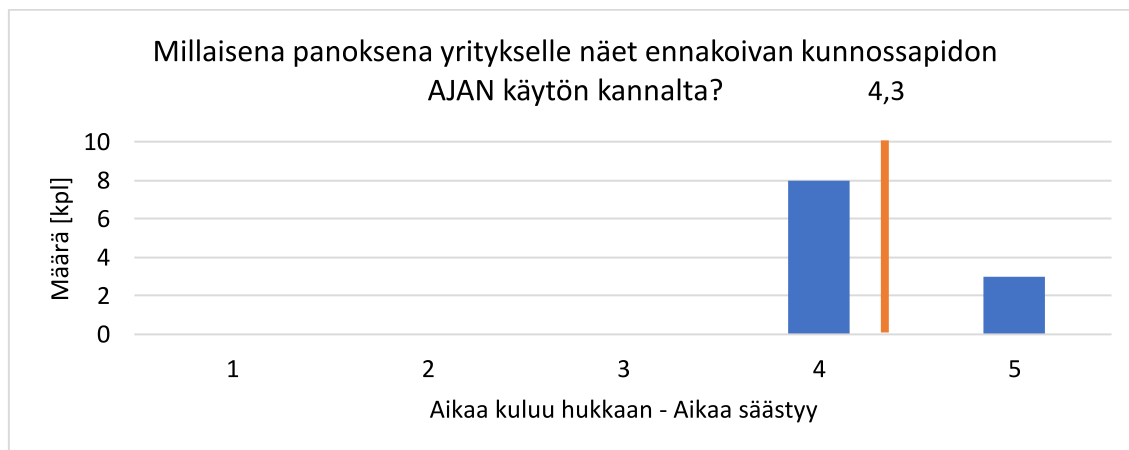
Kuinka tarpeellisenä näet ennakoivan kunnossapidon tämän päivän teollisuudessa?



Kuva 4. Kunnossapidon tarpeellisuus

Kysymyksen tarkoituksena oli kartoittaa tämän hetkinen tilanne, siitä kuinka tärkeänä panostuksena yrityksille nähdään, että laitteiden toimintakykyyn kiinnitetään huomiota. Tutkimuksen kohderyhmän valinta saattaa nostaa tuloksen keskiarvon todella korkeaksi, mutta myös alan kirjallisuus ja näkyvyys tukevat tulosta. Tämän hetkinen trendi näyttäisi olevan, että ennakoivaan kunnossapitoon panostetaan enemmän kuin aikaisemmin, sillä tuotantolaitteille ei yleensä ole varajärjestelmiä ja tuotannon katkokset ovat kalliita.

Millaisena panoksena yritykselle näet ennakoivan kunnossapidon AJAN käytön kannalta?

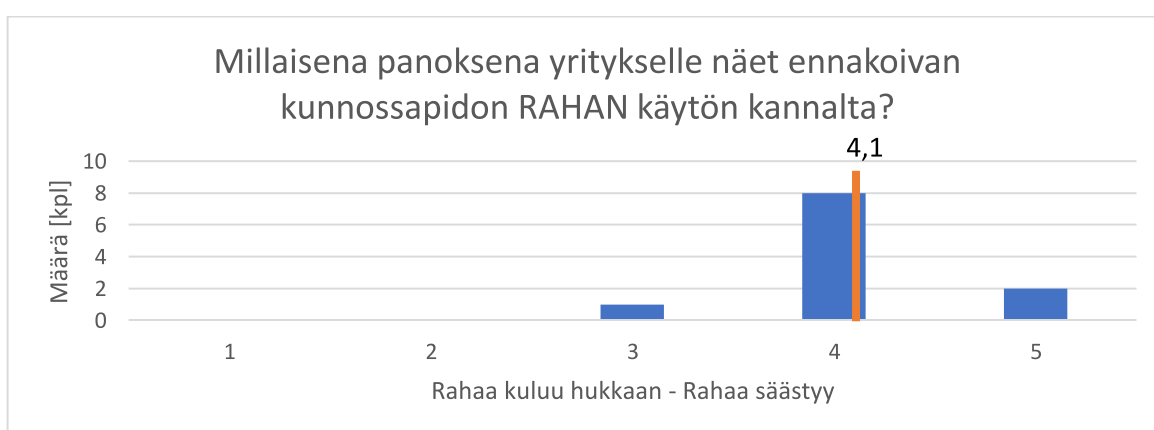


Kuva 5. Kunnossapidon kannattavuus ajan käytön suhteen

Kysymyksellä haettiin vastauksia siihen, kuinka ennakoivaan kunnossapitoon kulutetun ajan kuvitellaan hyödyttävän yritystä. Tarkoituksena oli huomioida kaikki mittaamiseen, suunnitteluun ja järjestelmän ylläpitämiseen kulutettu aika suhteessa siihen minkälaisia etuja on mahdollista saavuttaa.

Ennakoivaan kunnossapitoon kulutettu aika nähdään olevan yritykselle tärkeää ja on todennäköistä, että kulutettu aika maksaa itsensä takaisin.

Millaisena panoksena yritykselle näet ennakoivan kunnossapidon RAHAN käytön kannalta?

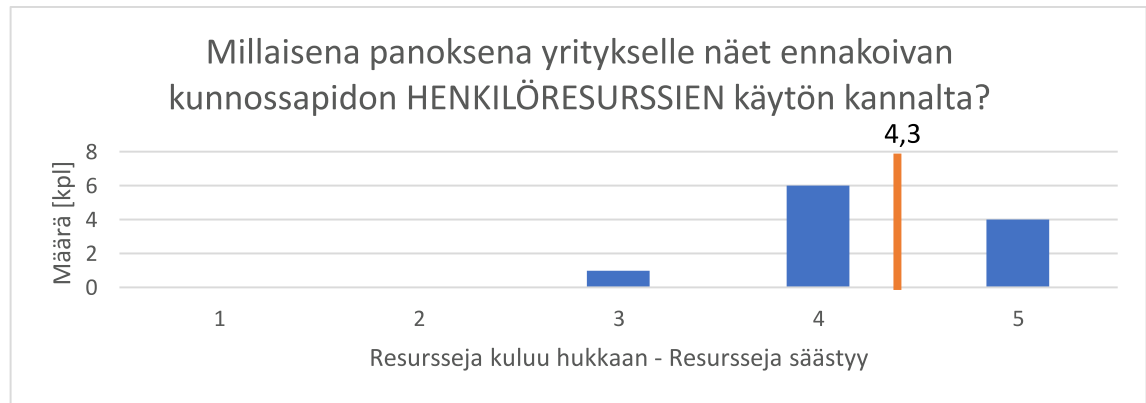


Kuva 6. Kunnossapidon kannattavuus rahan käytön suhteen

Ennakoivan kunnossapidon nähdään olevan rahallisesti kannattavaa yritykselle. Suorittamalla ennakoivaa kunnossapitoa, koetaan, että yrityksellä on mahdollisuus säästää rahaa. Rahan säästyminen nähdään olevan kuitenkin hieman pienempää

verrattuna ajalliseen säästöön. On syytä kuitenkin muistaa tutkimusryhmän pieni koko, joten kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä ei ole syytä tehdä.

Millaisena panoksena yritykselle näet ennakoivan kunnossapidon HENKILÖRESURSSIEN käytön kannalta?

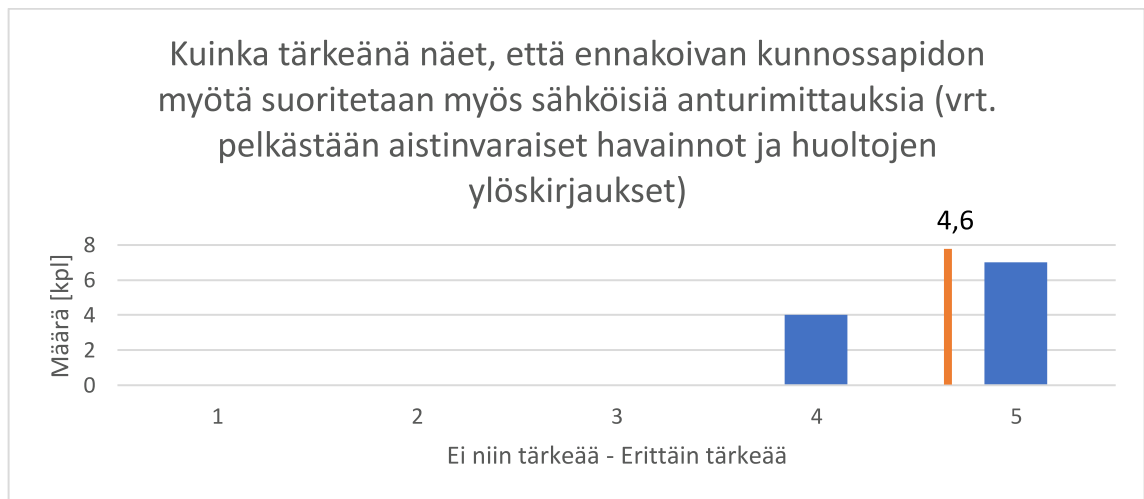


Kuva 7. Kunnossapidon kannattavuus henkilöresurssien käytön suhteen

Kysymyksen tarkoituksena oli kartoittaa näkemyksiä sille, kuinka tärkeää yrityksen on järjestää työntekijöitä suorittamaan ennakoivaa kunnossapitoa. Tutkimuksen tuloksissa näkyy, että työntekijöiden sijoittaminen suorittamaan tehtävää on kannattavaa.

Henkilöresurssien sijoittamisessakin on tietysti rajansa, niin kuin muissakin investoinneissa, sillä liiallinen panostaminen ei tuota ylimääräistä lisää yrityksen toiminnalle, vaan päinvastoin.

Kuinka tärkeänä näet, että ennakoivan kunnossapidon myötä suoritetaan myös sähköisiä anturimittauksia (vrt. pelkästään aistinvaraiset havainnot ja huoltojen ylöskirjaukset)



Kuva 8. Sähköisten anturimittausten tärkeys

Tuloksista on nähtävissä, että sähköisten anturimittausten suorittaminen koetaan todella tärkeänä. Digitalisoitumisen tuomat edut näkyvät myös tällä alalla, sillä enenevässä määrin on mahdollista mitata erilaisia parametreja, joiden avulla laitteiden kuntoa voidaan valvoa. Mittausten suorittaminen sähköisenä tuo mittaustuloksiin luotettavuutta ja toistettavuutta. Niiden objektiivisuus poistaa epävarmuustekijöitä, joten niiden pohjalta on helpompi ja parempi tehdä luotettavampia, pidemmälle tulevaisuuteen tähtääviä ennusteita.

Kuinka tärkeänä näet ennakoivan kunnossapidon kannalta, että tuotannon laitteet kartoitettaisiin komponenttitasolla?

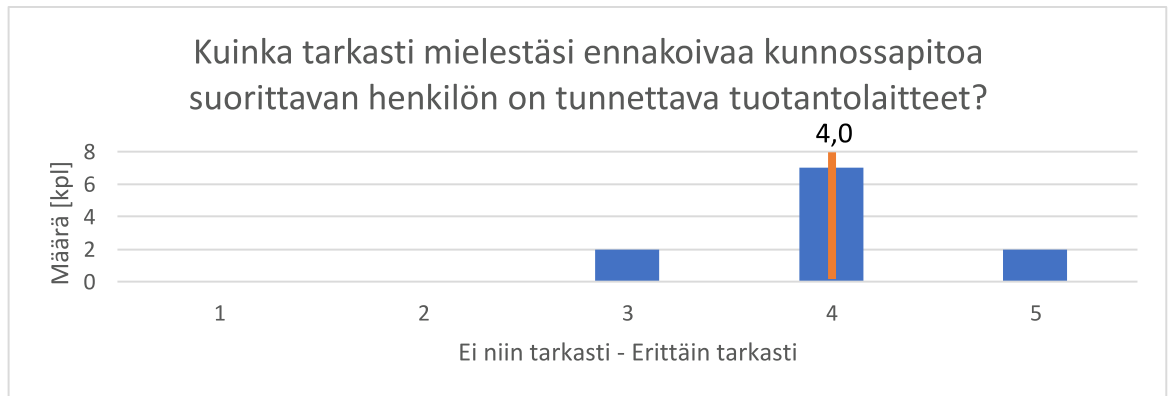


Kuva 9. Tuotantolaitteiden kartoituksen merkitys

Tuotantolaitteiden kartoittaminen komponenttitasolla koetaan olevan jonkin verran tärkeää. Se ei kuitenkaan ole pääosassa suoritettaessa ennakoivaa kunnossapitoa. On

kuitenkin tärkeää olla tietoisia siitä, millaisia komponentteja järjestelmästä löytyy, jo pelkästään varaosien saamisen kannalta.

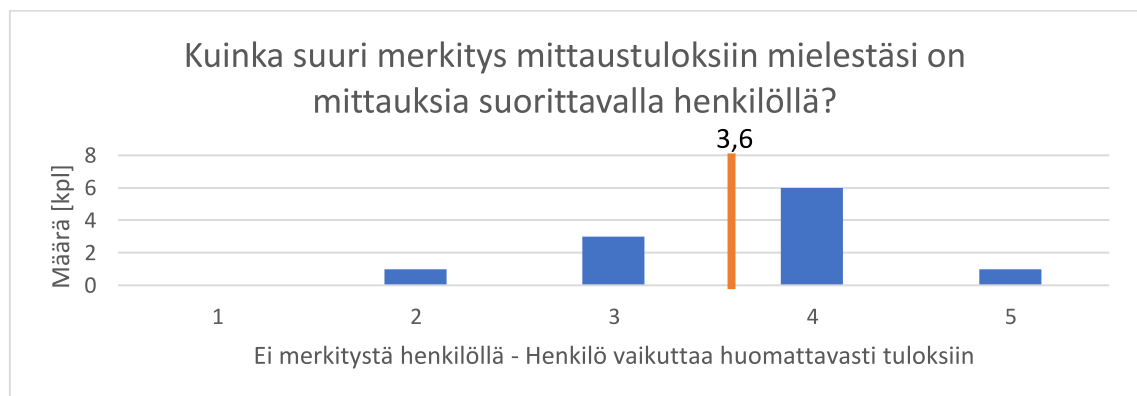
Kuinka tarkasti mielestäsi ennakoivaa kunnossapitoa suorittavan henkilön on tunnettava tuotantolaitteet?



Kuva 10. Tuotantolaitteiden tuntemisen merkitys

Ennakoivaa kunnossapitoa suorittavan henkilön on syytä olla melko tarkasti perillä tuotantolaitteista, joille hän suorittaa kunnossapitoa ja mittauksia. Kun tehtävää suorittava henkilö tietää kuinka laitteisto käyttäytyy, hänen on helpompi tehdä johtopäätöksiä kerätyistä mittaustuloksista. Tuotantolaitteiden tunteminen korostunee entisestään, kun suunnitellaan tapoja, joilla ennakointia voidaan suorittaa.

Kuinka suuri merkitys mittaustuloksiin mielestäsi on mittauksia suorittavalla henkilöllä?



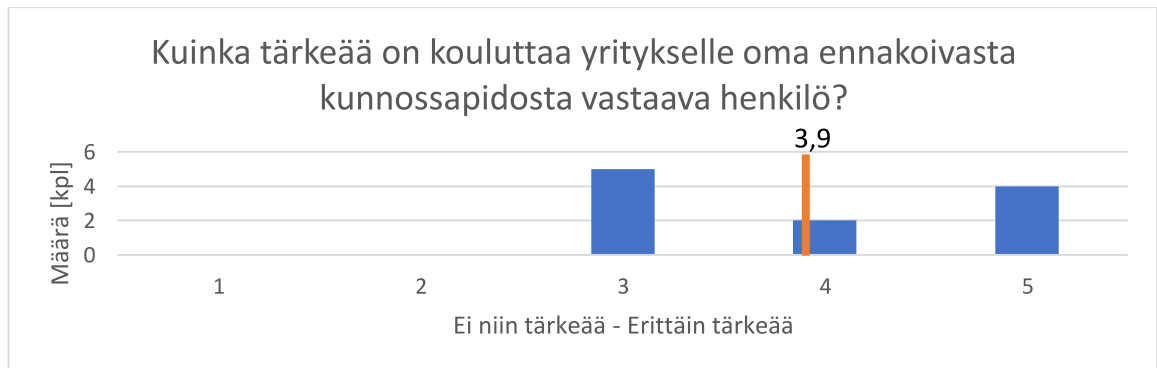
Kuva 11. Henkilön vaikutus kunnossapitomittauksiin

Kysymys liittyy hieman edeltävään kysymykseen, mutta tarkoituksena oli kartoittaa myös sitä, vaaditaanko mittauksia suorittavalta henkilöltä joitakin erityisiä ominaisuuksia, kuten koulutusta tai jotain muuta tietotaitoa.

Tuloksista käy ilmi, että henkilöllä on vähäinen vaikutus suoritettaviin mittauksiin ja sen tuloksiin. Henkilön on syytä tietää mitä ja miten laitteistosta mitataan erilaisia

parametreja, joilla ennakointia voidaan suorittaa. Mittausten suorittaminen vaikuttaa osittain tulosten virhemarginaaliin, joten myös tämän osalta voidaan nähdä, että henkilöllä on pientä vaikutusta tuloksiin.

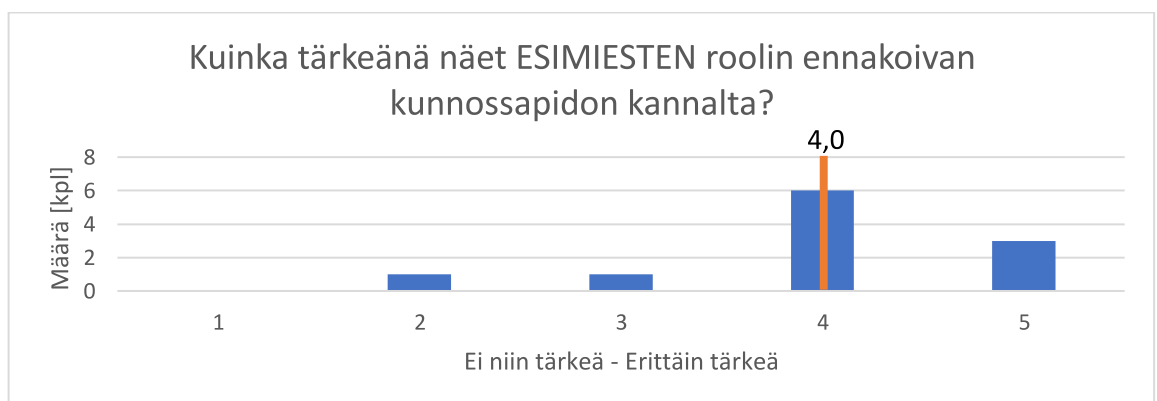
Kuinka tärkeää on kouluttaa yritykselle oma ennakoivasta kunnossapidosta vastaava henkilö?



Kuva 12. Yrityksen oman kunnossapitohenkilön tärkeys

Tutkimuksen tulosten mukaan koetaan, että yritykselle on melko tärkeää kouluttaa henkilö, joka vastaa ennakoivasta kunnossapidosta. Kouluttamalla oma henkilö, voidaan olettaa, että ollaan paremmin perillä yrityksen käytössä olevista laitteistoista. Vaikka mittauksia suoritettaisiin ulkopuolisen avulla, yrityksessä olevan kunnossapitovastaavan myötä voidaan paremmin koordinoita tehtäviä toimia.

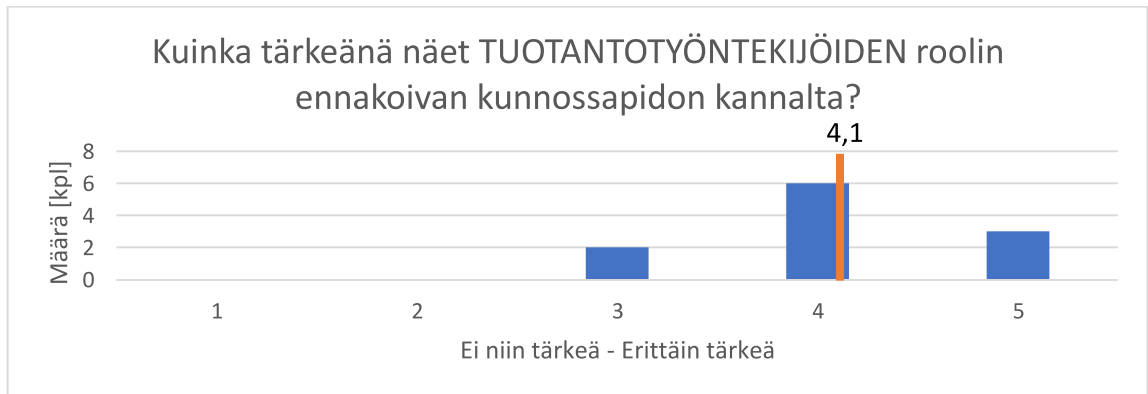
Kuinka tärkeänä näet ESIMIESTEN roolin ennakoivan kunnossapidon kannalta?



Kuva 13. Esimiesten tärkeys kunnossapidon osalta

Pääosin esimiesten nähdään olevan melko tärkeässä roolissa ennakoivan kunnossapidon kannalta. Heidän roolinsa lienee tärkein, kun järjestelmää suunnitellaan ja aloitettaessa käytännön asioita. Lisäksi heidän voidaan olettaa päättävän investoinneista niin rahallisesti, ajallisesti kuin henkilöresurssien osalta.

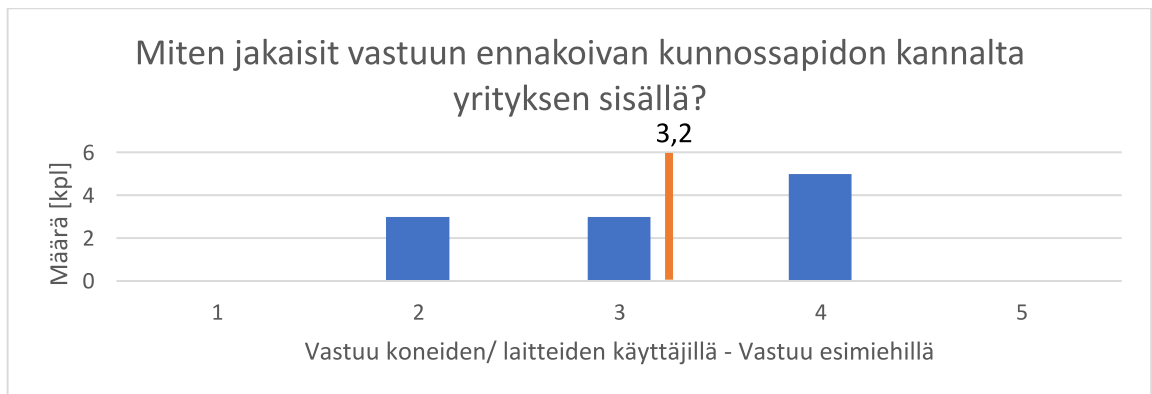
Kuinka tärkeänä näet TUOTANTOTYÖNTEKIJÖIDEN roolin ennakoivan kunnossapidon kannalta?



Kuva 14. Tuotantotyöntekijöiden tärkeys kunnossapidon osalta

Tuotantotyöntekijöiden katsotaan olevan hieman tärkeämmässä roolissa kuin esimiesten tarkasteltaessa ennakoivaa kunnossapitoa. Tämä johtunee siitä, että tuotantotyöntekijät ovat pääasiallisia laitteiston käyttäjiä, joten he ovat lähimmin kosketuksessa tarkasteltavan laitteiston kanssa. Heillä voidaan siis olettaa olevan enemmän käytännön vaikutusta laitteistojen toimintakyvyn ylläpitämiseen.

Miten jakaisit vastuun ennakoivan kunnossapidon kannalta yrityksen sisällä?



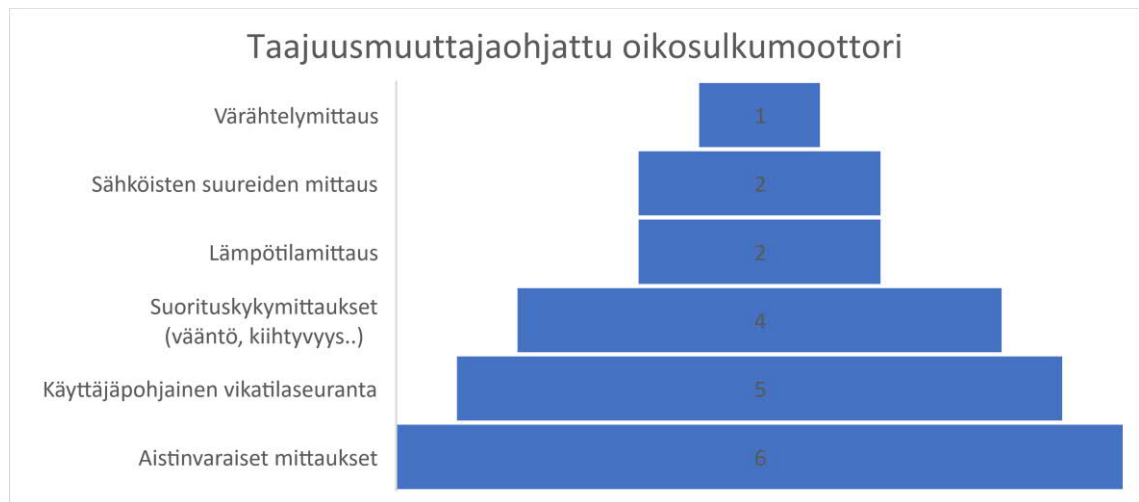
Kuva 15. Vastuujaottelu yrityksessä kunnossapidon osalta

Vastuun jakautuminen yrityksen sisällä nähdään jakautuvan melko tasaisesti esimiesten ja koneiden/ laitteiden käyttäjillä. Esimiehillä nähdään kuitenkin olevan hieman suurempi vastuu ennakoivasta kunnossapidosta. Tasainen jakautuminen voidaan olettaa johtuvan siitä, että onnistuva kunnossapito koskettaa kokonaisvaltaisesti koko yritystä.

2.3.2 Osio 2: Kunnossapidon tärkeysjärjestys

Tässä osioissa tarkastellaan mittauksen suorittamiseen ja sen analysoimiseen liittyvien asioiden tärkeyttä. Kysymysten avulla on laitettu erilaisia menetelmiä tärkeysjärjestykseen.

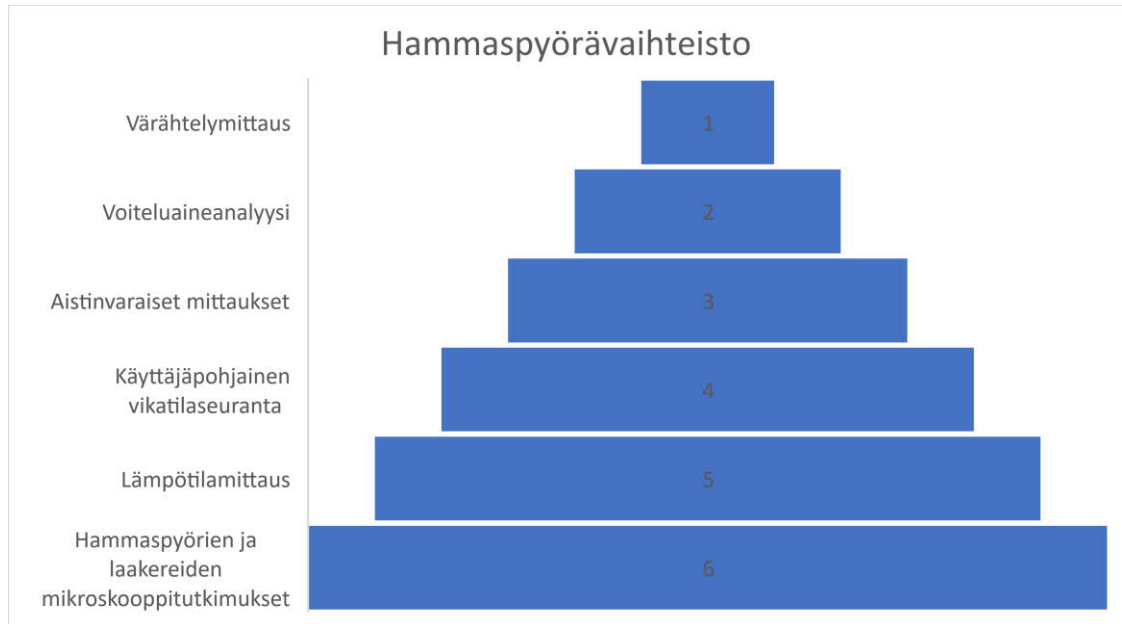
Laita tärkeysjärjestykseen seuraavat mittausmenetelmät taajuusmuuttajaohjatuille oikosulkumoottorille ennakoivaa kunnossapitoa ajatellen (1. tärkein)



Kuva 16. Oikosulkumoottorin kunnonseurannan tärkeimmät työkalut

Suoritettaessa ennakoivaa kunnossapitoa taajuusmuuttajaohjatuille oikosulkumoottorille, nähdään parhaimmaksi tavaksi käyttää värähtelymittausta. Värähtelymittauksella on mahdollista päästä todella hyvään ennakointiin vikatiloihin nähden. Oikosulkumoottorin vikatilat johtuvat pääosin laakereissa tapahtuvissa vaurioista, joten värähtelymittaus on siihen oikein hyvä menetelmä. Myös sähköiset suureet ja lämpötilamittaukset ovat nostettu korkealle tarkkailtaessa oikosulkumoottoreita.

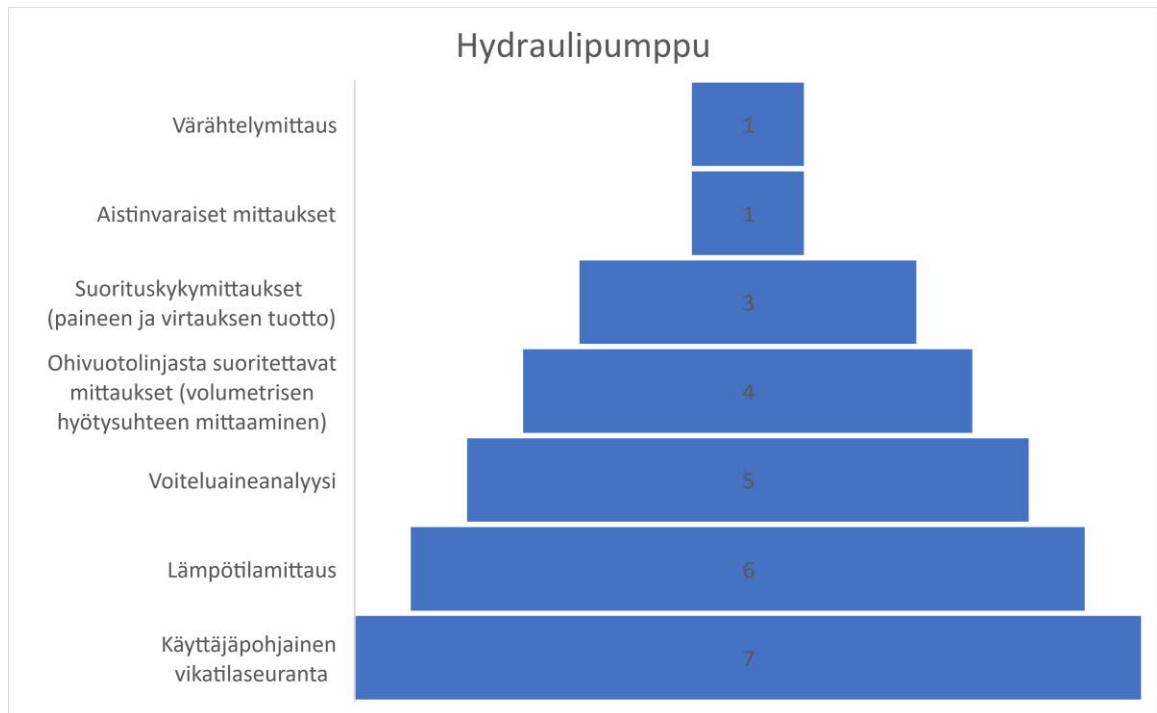
Laita tärkeysjärjestykseen seuraavat mittausmenetelmät mekaaniselle hammaspyörävaihteistolle ennakoivaa kunnossapitoa ajatellen (1. tärkein)



Kuva 17. Vaihteiston kunnonseurannan tärkeimmät työkalut

Mekaanista hammaspyörävaihteistoa seurattaessa tärkeimmäksi mittausmenetelmäksi nousi värähtelymittaus. Se soveltuu hyvin juurikin mekaanisten vikojen havainnoimiseen. Seuraavaksi tärkeimmäksi nousi voiteluaineanalyysi. Sen avulla saadaan tietoa kulumisesta voiteluaineeseen irronneista partikkeleista, jonka perusteella voidaan seurata vaihteistossa tapahtuvaa kulumista. Lisäksi laitteiston toiminnan ylläpitämiseksi voiteluaineen on oltava riittävän hyvää, jotta saavutettaisiin mahdollisimman pitkä elinikä.

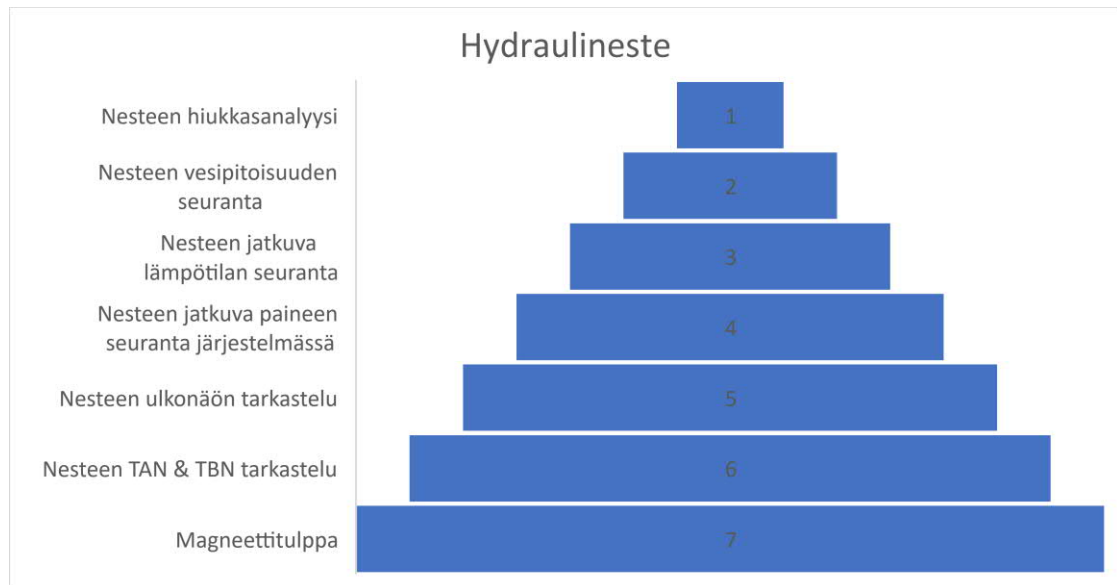
Laita tärkeysjärjestykseen mittausmenetelmät hydrauliselle hammaspyörä- & ruuvipumpulle ennakoivaa kunnossapitoa ajatellen (1. tärkein)



Kuva 18. Hydraulipumpun kunnonseurannan tärkeimmät työkalut

Myös hydraulipumpun kuntoa seurattaessa tärkeimmäksi menetelmäksi nousi värähtelymittaus. Verrattuna muihin laitteisiin, aistinvaraiset mittaukset nousivat todella korkealle. Ilmeisesti hydraulipumpun kulumista voidaan seurata hyvin myös ilman tarkkoja sähköisiä mittamenetelmiä, esimerkiksi kuuntelemalla tai visuaalisesti tarkkailemalla vuotoja tai toimintakykyä.

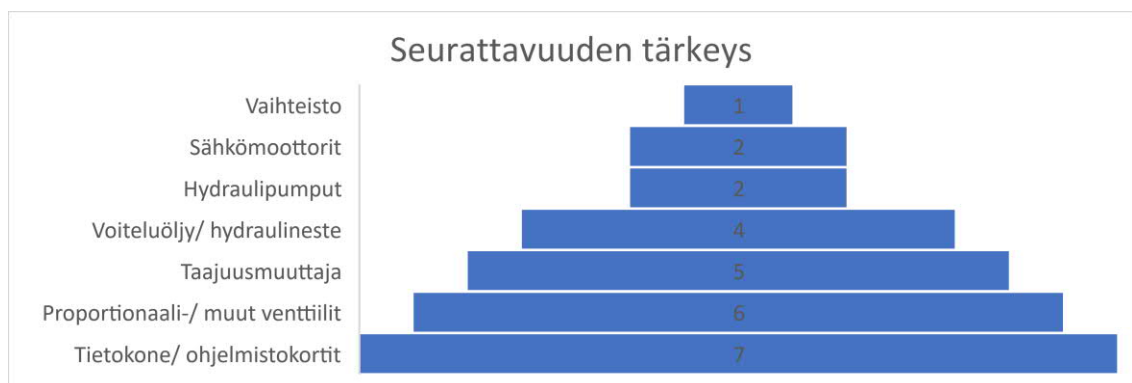
Laita tärkeysjärjestykseen mittausmenetelmät hydraulijärjestelmän nesteen kunnonseurantaan ennakoivaa kunnossapitoa ajatellen (1. tärkein)



Kuva 19. Hydraulinesteen kunnonseurannan tärkeimmät työkalut

Hydraulinesteen kunnon seuraamiseksi parhaimmaksi menetelmäksi nousi nesteelle suoritettava hiukkasanalyysi. Sen avulla voidaan selvittää nesteen puhtausluokitus, sekä myös mahdollisesti kulumiskohdat ja -tyyppi laitteistosta, kun suoritetaan metallografinen analyysi partikkeleista. Analyysin perusteella voidaan arvioida myös nesteen mahdollinen vaihtoajankohta.

Laita seurattavuuden kannalta komponentit tärkeysjärjestykseen järjestelmässä (1. tärkein seurattava)

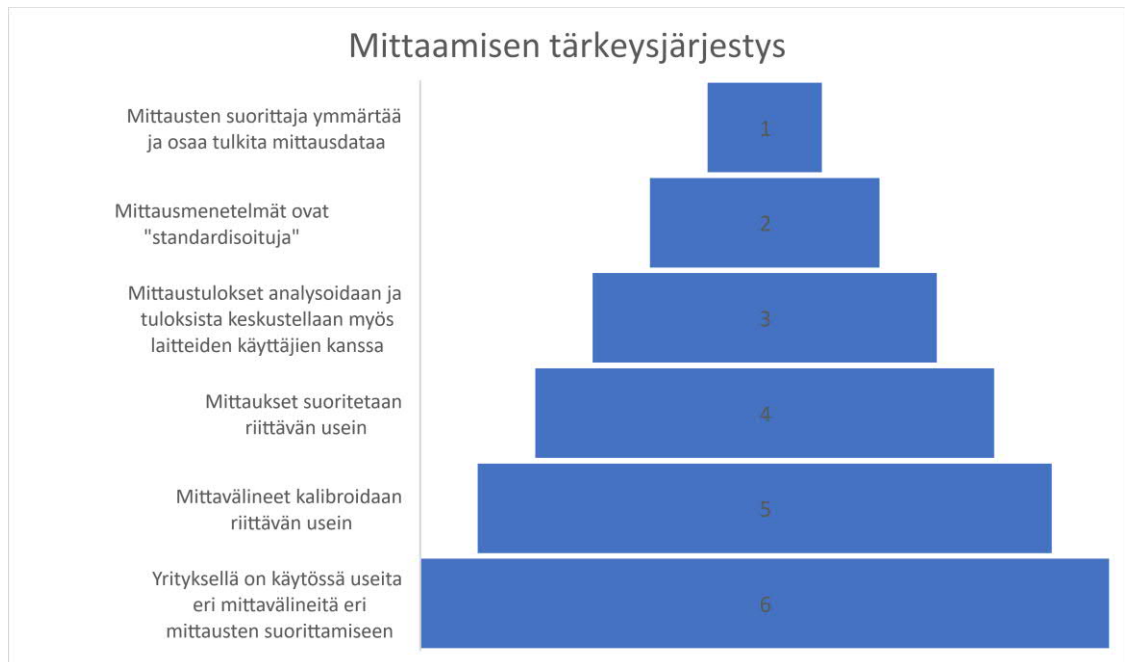


Kuva 20. Tärkeimmät seurattavat komponentit

Seurattavuuden kannalta tärkeimmäksi nousi vaihteistot. Tämä selittynee niiden kalliilla korjauksilla ja lähes varmana tuotannon pysäytyksenä. Lisäksi vaihteistot saattavat olla hyvin yksilöityjä juuri kyseiseen toimintatarkoitukseen tarkoitettuja, joten varajärjestelmiä ei ole saatavilla. Seuraavaksi tärkeimmät komponentit seurattavuuden

kannalta olivat sähkömoottorit ja hydraulipumput. Myös niiden toiminnan pysähtyminen aiheuttaa yleensä tuotannon katkeamisen, mutta ne voivat olla helpommin korvattavissa toisella vastaavalla laitteilla.

Laita seuraavat mittaustekniset asiat tärkeysjärjestykseen luotettavan mittauksen ja ennakoivan kunnossapidon kannalta (1. tärkein)



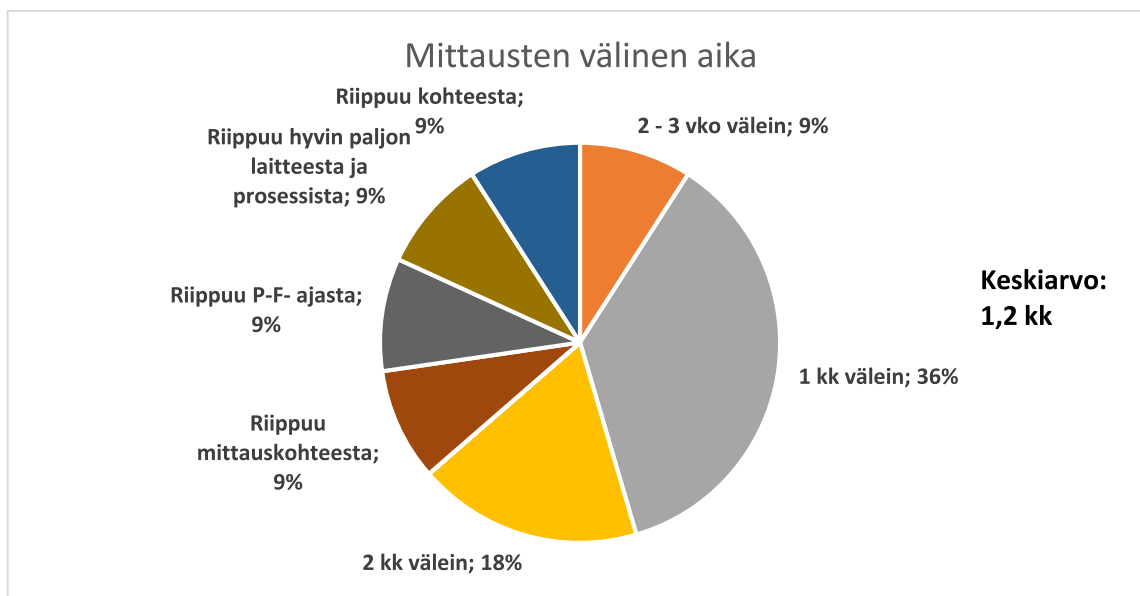
Kuva 21. Kunnonvalvontamittausten tärkeimmät tekijät

Mittaamisen kannalta tärkeimmäksi asiaksi nousi se, että mittausten suorittaja ymmärtää ja osaa tulkita mittausdataa. Oikeilla päätelmillä mittausdatasta on mahdollista tulkita laitteiston tämän hetkistä tilaa ja tehdä ennustuksia sen käyttöiästä. Tärkeäksi koettiin myös se, että mittausmenetelmät suoritetaan aina samalla tavalla, sekä tulokset oikeasti analysoidaan ja käydään läpi myös koneiden käyttäjien kanssa. Käymällä läpi tulokset käyttäjien kanssa varmistetaan siitä, että kaikki tietävät laitteiston tämän hetkisen tilan, eikä väärinkäyttöjä tapahdu.

2.3.3 Osio 3: Kunnossapidon mittausteknillisiä asioita

Tässä osiossa keskityttiin tarkastelemaan suoritettavia mittauksia sekä mittaustekniikkaan.

Mikä on mielestäsi kohtuullinen mittausaikaväli, jotta tarpeen mukaiseen ennakoivaan kunnossapitoon on mahdollista vielä päästä?



Kuva 22. Kunnonvalvontamittausten välinen aika

Kysymyksellä haettiin vastausta siihen, millaisia aikavälejä yleisesti teollisuudessa käytetään, kun mittauksia suoritetaan. Tarkoituksena oli löytää jokin sellainen aikaväli, jolla on vielä mahdollista päästä ennakoivaan kunnossapitoon. Keskiarvoksi nousi noin 1,2kk. Tämän koettiin olevan vielä järkevä aikaväli mittausten välille. Vastauksissa nousi esille myös paljon sitä, että aikaväli riippuu hyvin paljon kohteesta.

Minkälaisia työkaluja yrityksellä olisi syytä vähintään olla, mikäli se haluaa suorittaa ennakoivaa kunnossapitoa omavaraisesti? (mahdollista valita useampia)

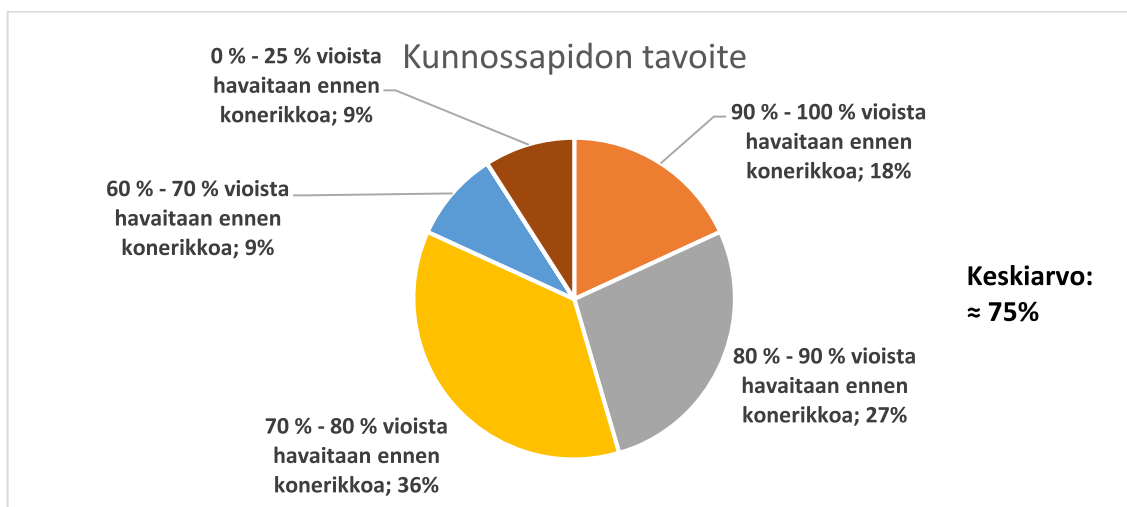


Kuva 23. Kunnonvalvontaan tärkeimmät työkalut

Tärkeimmiksi työkaluiksi yrityksille nousivat monipuolinen värähtelymittari sekä lämpökamera. Värähtelymittausten tärkeys kävi ilmi jo aiemmin, kun pohdittiin parhaita menetelmiä eri laitteiden seurantaan. Se oli ensimmäisenä vaihtoehtona lähes joka laitteella.

Myös yleismittarin tärkeys sekä ohjelmisto, jolla tulosten analysointia voidaan suorittaa, nousivat korkealle. Lisäyksiä alkuperäiseen listaan tulivat stetoskooppi sekä kyky ja malli visuaalisille tarkastuksille.

Minkälaiseen tavoitteeseen vikojen ennalta havaitsemisen kannalta olisi syytä päästä, jotta ennakointia voidaan pitää onnistuneena?

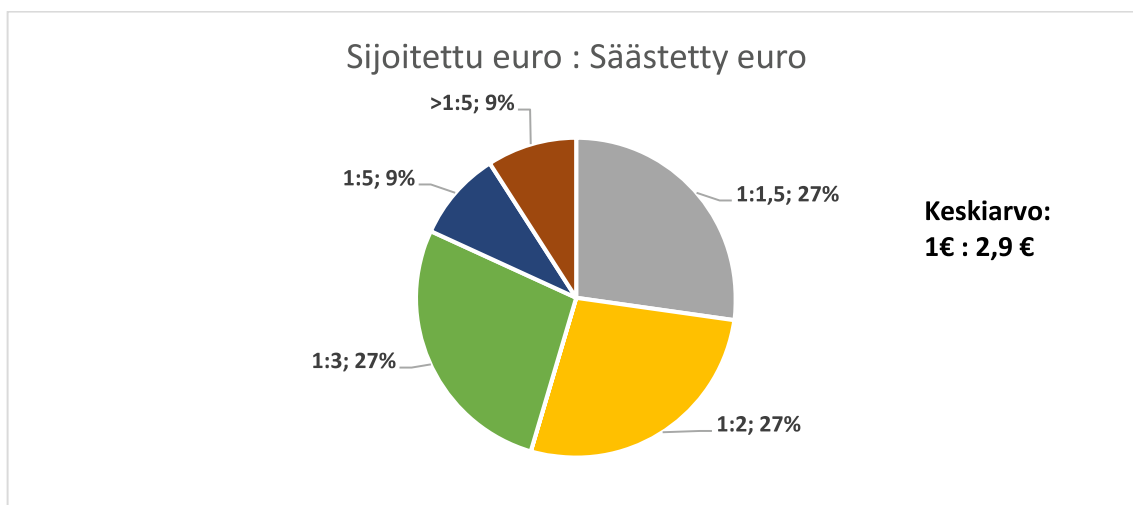


Kuva 24. Kunnossapidon tavoite

Kysymyksellä tarkasteltiin ennakoivan kunnossapidon tavoitetasoa, jolle olisi syytä yltää, jotta sitä voitaisiin pitää onnistuneena. Yleiseksi tavoitetasoksi asettui noin 75 %. Tämä tarkoittaa, että noin kolme neljästä tulevasta viasta olisi syytä pystyä ennustamaan riittävästi etukäteen. Näin niihin voidaan reagoida riittävällä aikavälillä, jotta tuotannon pysäytykset saataisiin minimoitua.

Tuloksista on syytä huomata se, että on mahdotonta päästä 100 % tavoitteeseen vikojen ennalta havaitsemisessa. Tästä syystä, vaikka ennakoivaa kunnossapitoa suoritetaan, aina tulee olemaan yllättäviä vikatilanteita, joihin ei pystytty varautumaan etukäteen.

Millaisena rahallisena investointina näet ennakoivaan kunnossapitoon sijoitetun rahan? (sijoitettu euro vs. säästetty euro)



Kuva 25. Kunnossapitoon sijoitetun euron suhde säästettyyn euroon

Tarkasteltaessa rahallista investointia ennakoivaan kunnossapitoon yleisenä vastauksena oli, että investointi säästää rahaa. Keskimääräisesti nähtiin, että sijoitettu euro vastaa noin 2,9 säästettyä euroa, eli arvo noin kolminkertaistuu. Säästöjä saadaan, kun tuotannon keskeytykset voidaan minimoida tai kun vältetään turhia osien vaihtamisia. Tällöin säästöjä kertyy sekä työajassa että rahallisesti.

2.3.4 Osio 4: Vapaa sana

Kyselyn lopussa oli vielä mahdollisuus vastata erilaisten kysymysten kautta aiheeseen liittyviin asioihin. Tarkoituksena oli, että vastaaja saa omin sanoin kertoa omista kokemuksistaan ja näkemyksistään kysymysten puitteissa.

Minkälaisia haasteita useimmiten kohdataan ennakoivan kunnossapidon osalta? (aloitettaessa, ylläpito jne..)

- Kunnossapitokulttuurin luominen on haasteellista, samoin kuin sen ylläpito normaaleissa päivittäisissä rutiineissa.
- Ennakoivan kunnossapidon järjestämiseen ei ole tarvittavia resursseja.
- Aloituskustannukset, itse vai ulkopuolinen, ulkopuolinen kustannukset, oma väki resurssit
- Kriittisyysanalyysin puute
- Ennakoiva KP [kunnossapito] nähdään vain kuluna vaikka sillä säästetään rahaa ajan kanssa.
- Ennakoitua kunnossapitoa aletaan tekemään yksinkertaistetun prosessin kautta, kun sitä on toistettu ilman ongelmatilanteita. Ei ole hankittu sopivia välineitä.

- Hankintaan mittarit, mutta ei osata tai keretä käyttämään
- Henkilöstöresurssien varaus
- Ennakoinnin varmuus, milloin laite oikeasti kulahtaa. Havaitseminen.
- Osaavat Resurssit

Kysymyksen avulla saatiin hyvin kattava lista erilaisista ongelmista, joita voi nousta esille ennakoivan kunnossapidon eri vaiheissa. Yhdistävänä tekijänä voidaan ehkä pitää sitä, että asenne kunnossapidon tärkeyttä kohtaan voi olla aliarvioiva. Aliarvioiminen johtaa osaltaan taas muihin ongelmiin, kuten kunnossapitokulttuurin ylläpitämisen vaikeuteen tai ylipäättänsä investointien pienenemisenä rahallisesti tai ajallisesti asiaan.

Tärkeää haasteiden voittamisessa on ihmisten oikeanlainen motivoiminen suorittamaan ennakoivaa kunnossapitoa, joka voi näkyä esimerkiksi kouluttamalla ja järjestämällä oikeasti aikaa, järjestelmää ylläpitävillä henkilöille, suorittaa tarvittavat toimenpiteet. Lisäksi oikeanlaisella suunnittelulla, jossa huomioidaan yritykselle olennaiset asiat, edesauttaa järjestelmän pysymistä mielenkiintoisena sekä tehokkaana.

Koetko, että yritykset suhtautuvat nykyään kunnossapitoon eritavalla kuin aikaisemmin? (mikä on muuttunut, miksi?)

- Asiaan kiinnitetään yleisellä tasolla enemmän huomiota, mutta käytännön toteutuksissa on suuria eroja.
- Koko ajan pitäisi koneiden käyttöasteiden nousta, joten niiden pitää myös pysyä kunnossa ilman tuotantokatkoja. Tähän on pikkuhiljaa herätty täälläkin.
- Ohjelmistoja päivitetään, mutta mekaanisen laitteiston parantaminen tuntuu kankealta
- Ei ole aikaa, otetaan lisää riskiä
- Osalle teollisuutta se on must ja muille jotain hankalaa ja "ei tarpeellista". Tai sitten homma toimii niin ei ole konerikkoja eli KP:sta [*kunnossapidosta*] voidaan nipistää vaikka juuri se on säästänyt rahaa.
- Aiemmin oli tutkimuslähtöisempää ja nykyisin on rutiininomaisempaa.
- Ehkä jopa enemmän "tulipalon sammutuksia", koska kiire
- Nuori sukupolvi suhtautuu positiivisesti
- Yritykset panostavat ennakointiin, jotta pystyvät suunnittelemaan esim. huoltoseisakkeja paremmin ja tehokkaammiksi.
- Panostetaan ennakoivaan enemmän kuin aikaisemmin

Vastauksista ilmenee, että kiireellisyys näkyy myös tällä osa-alueella. Kunnossapidolta vaaditaan paljon, mutta siihen ei ole aikaa panostaa tarpeeksi. Lisäksi tuotantolaitteiden ollessa ilman varajärjestelmiä, kunnossapito siirtyy entistä enemmän ennakoivampaan suuntaan.

Vastauksista voidaan myös havaita, että tulevaisuudessa ala on yhä tärkeämmässä osiossa yritysten toimintaa. Tätä kuvaa se, että yhä enemmän suhtaudutaan asiaan positiivisemmin sekä siihen oikeasti panostetaan yritysten osalta, jotta ylimääräisiltä tuotantokatkosilta voitaisiin välttyä.

Järjestetäänkö mielestäsi riittävästi koulutusta ennakoivaa kunnossapitoa ajatellen? Minkälaista koulutusta olet saanut?

- Työpaikan kautta en juuri ole saanut koulutusta, oman opiskelun kautta kyllä.
- Yrityksen puolesta ei ole järjestetty koulutusta.
- Ei riittävästi
- värähtelykurseja ja voiteluaineista. Sekä mitä on ennakoiva KP [*kunnossapito*].
- Laitetoimittajien omia koulutuksia, sekä sertifioituja osaamiskoulutuksia
- Oppilaitokset eivät satsaa tarpeeksi
- Olen oppinut käytännössä itse DI-työtä [*diplomityötä*] tehdessä ja kuulopuheen perusteella ammattilaisilta
- Voisi olla enemmän tarjontaa

Kysymyksen vastauksissa käy hyvin ilmi, että kyseiselle alalla ei ole olemassa riittävästi helposti saatavilla olevaa koulutusta. Tämä on hieman ristiriidassa siihen tietoon, että ala on jatkuvassa kasvussa ja siihen panostetaan yrityksissä entistä enemmän.

Järjestettävät koulutukset ovat hyvin pitkälti yritysten itse järjestämiä kurssiluontoista opetusta tai tieto on itse opiskeltava jostakin tietolähteestä. Varsinaista opetusta oppilaitoksissa tälle alalle on saatavilla hyvin vähän. Alalle on tultava jonkin ammattilaisen oppiin pelkästään yleistiedoilla laitteistoista ja järjestelmistä.

Mikä on mielestäsi tärkein asia, joka liittyy ennakoivaan kunnossapitoon?

- Asenteen muuttaminen henkilöstössä ja pienten kunnossapitoa helpottavien asioiden vaihteittainen käyttöönotto.
- Estää vahingot ihmisille, 2. Estää pitkät tuotantokatkot.
- Ennakoiva kunnossapito kokonaisuutena, osana päivittäistä rutiinia.
- Ymmärrys että mitä aioitaan ennakoida?
- jatkuva työ, osaava henkilöstö ja hyvä verkosto (alihankkija-apu)
- Kriittisten komponenttien kattava arviointi.
- Kiinnostus asiaan ja mahdollisuus tehdä työ kunnolla
- Jatkuva seuranta ja prosessituntemus.
- Osaava henkilökunta

Tärkeimmäksi tekijäksi toimivan ennakoivan kunnossapidon saavuttamiseksi voitaisiin nostaa asiansa osaava ja motivoitunut henkilökunta. Kun tämä on kunnossa, on tärkeää, että järjestelmä toimii oikealla tavalla ja sillä pystytään estämään todellisia

tuotantokatkoksia. Hyvä suunnittelutyö on myös ensiarvoisen tärkeää, jotta motivaatio pysyy yllä ja asetettuihin tavoitteisiin olisi mahdollista päästä.

Henkilökunnan nostaminen yhdeksi tärkeimmäksi asiaksi ennakoivassa kunnossapidossa kuvastaa sitä, että työn onnistumiseksi on syytä käyttää aikaa työntekijöiden kouluttamiseen ja perehdyttämiseen kyseiseen työhön. Lisäksi voidaan havaita, vaikka työ perustuu pitkälti anturimittauksiin, silti niiden tulkinnessa siitä mitä toimenpiteitä tulokset aiheuttavat, tarvitaan ihmisiä.

2.3.5 Tutkimuksen johtopäätökset

Tutkimuksen tuloksista voidaan havaita, että kunnossapitoala tulee kasvamaan tulevaisuudessa. Siihen tullaan panostamaan entistä enemmän ja siltä odotetaan yhä parempia tuloksia. Kuitenkin tuloksista voidaan lukea myös se tosiasia, että tällä hetkellä koulutus alalle on hyvin heikkoa, vaikka suorittava henkilökunta on yksi tärkeimmistä tekijöistä, jotta työ onnistuu. Tämä on hieman ristiriidassa tulevaisuuden jatkon kannalta.

Ennakoiva kunnossapito koetaan olevan tärkeässä roolissa ja siihen satsattu panostus yleisesti ottaen tuottaa itsensä joka osa-alueella takaisin. Rahallisena investointina koettiin, että järjestelmään sijoitettu raha tuottaisi itsensä noin kolminkertaisena takaisin. On syytä muistaa kuitenkin, että rahallinen takaisinmaksu tapahtuu pitkällä aikavälillä, joten takaisinmaksu ei tapahdu välttämättä hetkessä. Tämän vuoksi saavutettaville tuloksille on annettava riittävästi aikaa, jotta nähdään, onko järjestelmä hyödyllinen.

Vastuun jakautuminen yrityksen sisällä koetaan olevan tasaista. Ennakoiva kunnossapito on sen verran kokonaisvaltaista, että se koskettaa niin esimiehiä kuin tuotantotyöntekijöitäkin. Tuotantotyöntekijöillä kuitenkin nähtiin olevan hieman isompi rooli kuin esimiehillä onnistuneen kunnossapidon kannalta. Kuitenkin pääasiallinen vastuu on aina esimiehillä.

Mittausmenetelmistä nousi esille selvästi värähtelymittaukset. Niiden käyttäminen ennakoivan kunnossapidon apuna koettiin olevan tärkeää hyvin monen komponentin seurannassa. Värähtelymittauksilla saavutettavat tiedot ovat hyvin laajat ja niillä on mahdollista päästä hyvinkin suureen ennakointiasemaan suhteessa vikaantumiseen. Monipuolinen värähtelymittari koettiin olevan myös yksi tärkeimmistä työkaluista, joka yrityksen on syytä hankkia, kun se aikoo suorittaa ennakoivaa kunnossapitoa omavaraisesti.

Värähtelymittarin ohella myös lämpökamera ja yleismittari koettiin olevan tärkeässä asemassa, kun yritys suunnittelee työkaluhankintoja järjestelmän ylläpitämiseen. Lisäksi tietokoneohjelmisto kaiken mittausdatan käsittelyyn, nousi myös korkealle hankintalistalla.

Itse suoritettavista mittauksista todettiin, että suositeltava mittausaikaväli riippuu hyvin paljon laitteesta, mutta keskimääräisesti se voisi olla reilu kuukausi. Koettiin, että tällöin on mahdollista vielä pitää mittauksia ennakoivana kunnossapitona. Mittauksilla saavutettavien havaintojen koettiin onnistuneen, mikäli noin 75 % vikatapauksista kyetään havainnoimaan ennen varsinaista konerikkoa.

3. TARKASTELTAVAN LAITTEISTON ESITTELY

Diplomityö toteutetaan pääasiallisesti yhtä tuotantolaitetta silmällä pitäen, mutta tarkoituksena on, että työ olisi laajennettavissa myös hyvin yleispätevästi muille teollisuudessa käytettäville laitteille. Tästä syystä laitteiston kovin tarkkoja suorituskyyrvoja ei käydä tässä kohdin läpi. Kappaleessa käydään läpi ainoastaan laitteiston tärkeimmät rakenteelliset tekijät, jotka vaikuttavat laitteen toimintakykyyn ja ovat merkittävässä asemassa kunnossapitoa ajatellen.

Tarkasteltava laitteisto koostuu neljästä eri osa-alueesta: mekaanisesta hammaspyörävaihteistosta, hydraulikka-, pneumatiikka- sekä sähkö- ja tietokonejärjestelmästä. Laitteiston ollessa näin laaja myös erilaiset vikaantumismahdollisuudet kasvavat suureksi. Tästä syystä suunniteltaessa mittauksiin perustuvaa kunnonvalvontaa, on hyvä tiedostaa erilaiset vikaantumismenetelmät eri osa-alueilta.

Laitteiston pääasiallinen tarkoitus on toimia hydraulisena testausalustana polttoainetoimisille komponenteille. Laitteen avulla voidaan säätää komponentteja ja varmistua siitä, että ne toimivat asiaan kuuluvalla tavalla. Hydraulikkajärjestelmällä nähdään olevan suurin merkitys laitteiston toiminnan kannalta. Tästä syystä siihen on kohdistunut tällä hetkellä eniten kunnossapitoa, lähinnä suunniteltujen nesteiden seurannan ja vaihtojen avulla.

Laitteiston hydraulikkajärjestelmä koostuu neljästä osajärjestelmästä, joita yhdistää suuritilavuuksinen tankki. Järjestelmästä löytyy neljä erillistä hydraulipumppua, joiden tehtävät eroavat hieman toisistaan. Pääasialliset tehtävät järjestelmän pumpuilla ovat: hydraulikkajärjestelmän virtauksen tuotto, paineen tuotto, valuma-altaan tyhjennys sekä hydraulikkanesteen jäähdytys- ja suodatuspiirin pyöritys. Pääasialliset pumput ovat hammaspyöräpumppuja, mutta tilavuusvirran tuotto järjestelmään hoidetaan ruuvipumpulla.

Hydraulikkajärjestelmästä löytyy myös erilaisia antureita, joiden avulla laitteistolla suoritettavaa prosessia voidaan valvoa ja suorittaa. Tärkeimmät mitattavat parametrit ovat: järjestelmän paine, lämpötila ja virtaus eri kohdissa laitteistoa. Näitä arvoja käytetään hyväksi pyydetessä järjestelmältä tiettyjä ominaisuuksia testejä tehtäessä, mutta myös tarkasteltaessa säädettävän komponentin suoritusarvoja. Esimerkiksi virtauksen mittaamiseen laitteistossa käytetään turbiinantureita, joiden vikaantumista on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.2.4.

Normaalin hydraulikkajärjestelmän tavoin järjestelmässä on myös erilaisia venttiileitä ja suodattimia. Venttiileistä herkimpiä vikaantumaan ovat proportionaaliventtiilit, joiden vikaantumista tarkastellaan tarkemmin kappaleessa 4.2.4.

Pneumatiikkaa laitteistossa tarvitaan pääasiassa hydraulisten toimilaitteiden ohjaajina. Esimerkiksi osa hydraulikkaventtiileistä ovat paineilmaohjattuja. Paineilman tuottajana toimii ruuvikompressori. Tarkempia kuvauksia mahdollisista vikatilanteista pneumatiikan osalta on käsitelty kappaleessa 4.3.

Sähköjärjestelmän pääasialliset komponentit ovat oikosulkumoottorit. Niitä käytetään tuottamaan momenttia hydraulikkapumpuille, mutta myös mekaaniselle pyöritysjärjestelmälle vaihteiston kautta. Sähkömoottoreita järjestelmästä löytyy kaiken kaikkiaan kuusi kappaletta. Ne vaihtelevat kooltaan pienestä alta 0,5 kW moottorista yli 100 kW moottoriin. Osaa epätahtimoottoreista ohjataan taajuusmuuttajilla, joiden avulla voidaan kierrosnopeussäätö tehdä täysin portaattomasti halutulle nopeudelle. Sähköjärjestelmään liittyviä vikatilanteita tarkastellaan tarkemmin kappaleessa 4.4.

Laitteiston ohjaaminen tapahtuu tietokoneen avulla. Sen avulla voidaan suorittaa tarvittavia testejä eri komponenteille. Tietokoneelta voidaan pyytää haluttuja parametreja, joita järjestelmän on pyrittävä toteuttamaan. Tietokoneelta voidaan lukea myös anturitietoja testattavan kappaleen suorituskyvystä, sekä itse laitteiston sen hetkisestä suoritusrvoista. Pääosa vaatimuksista, joita laitteelta pyydetään, ovat hydraulikkaan liittyviä suorituskyyarvoja, kuten virtausmäärää tai painetta.

Testattavien laitteiden mekaaninen pyörittäminen tapahtuu oikosulkumoottorilla vaihteiston kautta. Vaihteisto koostuu kahdesta käytettävästä akselist ja oikosulkumoottorilta tulevalta käytävästä akselist. Hammaspyörävälityksillä saadaan pyörintänopeus muutettua halutunlaiseksi. Hammaspyörävaihteistoa voidellaan öljyvoitelulla, jossa öljyn kierrättäminen hoidetaan hydraulikkapumpulla. Vaihteiston ollessa täysin tähän laitteistoon räätälöity, sille ei ole olemassa korvaavaa varajärjestelmää. Tämän vuoksi sen kunnonseuraaminen on ensiarvoisen tärkeää [16].

3.1 Hydraulikkajärjestelmät

Testilaitteiston hydraulikkajärjestelmä koostuu neljästä pienemmästä osajärjestelmästä. Jokainen näistä on oma itsenäinen järjestelmä, jota pyörittää oma hydraulipumppu. Järjestelmien pääpiirteinen rakenne ja tehtävä on käyty omissa alakappaleissaan.

Kunnossapidon merkitys korostuu tämän laitteiston osalta, koska sen toimintaolosuhteet ovat verrattain haastavat, kun tarkastellaan normaalia teollisuudessa käytettävää hydraulikkajärjestelmää. Suurimman haasteen laitteiston hydraulikkajärjestelmän toiminnalle asettanee siinä käytettävän nesteen todella alhainen viskositeetti.

Viskositeetin ollessa vain noin $1,2 \text{ mm}^2/\text{s}$ 20°C lämpötilassa. Tämä on lähes kymmenen kertaa niin pieni kuin teollisuudessa yleisesti pienimmät käytettävät viskositeetit.

Hydrauliikkajärjestelmän toimintaa voisi parhaiten kuvata vertaamalla sitä dieselpolttoainelaitteistoon. Molempien järjestelmien käyttöpaineet ovat kohtuullisen suuria ja käytettävät nesteet ovat haastavia järjestelmälle. Dieselin kinemaattisen viskositeetin ollessa kuitenkin noin $4,5 \text{ mm}^2/\text{s}$, se on silti lähes nelinkertainen verrattuna tarkasteltavan laitteiston nesteeseen [46]. Pienen viskositeetin aiheuttamia ongelmia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.2.2.

3.1.1 Matalapainejärjestelmä

Matalapainejärjestelmän tehtävä on tuottaa tarvittava tilavuusvirtaus laitteistossa. Tilavuusvirtausta tuottaa ruuvipumppu, jonka käyttövoimana toimii taajuusmuuttajaohjattu oikosulkumoottori. Taajuusmuuttajan avulla oikosulkumoottorin pyörintänopeutta saadaan säädettyä täysin portaattomasti. Koska ruuvipumput ovat kiinteätilavuuksisia pumppuja, tilavuusvirran säätö tapahtuu pelkästään kierrosnopeutta säätämällä.

Matalapainejärjestelmä on yhdistettynä suuritilavuuksiseen tankkiin, jonka nestettä se kierrättää testattavalle laitteelle. Vaaditut paineet ja tilavuusvirrat vaihtelevat testiajosta riippuen, paineen ollessa noin 2 MPa ja tilavuusvirran maksimin 135 L/min . Pienellä paineella on tarkoitus siirtää suurta määrää nestettä.

Järjestelmään on sijoitettu useita eri antureita, joiden tehtävänä on toimia takaisinkytkentää varten mittaussignaalin tuottajina, josta voidaan laskea referenssin avulla tarvittava säätöarvo. Antureiden avulla tarkkaillaan myös testattavan laitteen suorituskykyä. Tärkeimmät anturit matalapainelinjastossa ovat tilavuusvirtausta mittaavat turbiinianturit sekä järjestelmän nesteen paineanturit ja PT-100 lämpötila-anturit.

Matalapainelinjastoon on kytketty myös hydrauliikkanesteen suodattimia. Tankissa itsessään sijaitsee karkea suodatin, jonka tarkoituksena on suodattaa suuret partikkelit ynnä muut vierasesineet tankista. Ruuvipumpun jälkeen on sijoitettu varsinainen linjaston suodatin, jonka suodatusteho on $\beta_5 = 1000$. Beta-arvon vaikutusta suodatustehoon on tarkasteltu lähemmin kappaleessa 4.2.1 [16].

Riskikartoituksen avulla matalapainejärjestelmän riskialttiimmiksi komponenteiksi havaittiin ruuvipumppu ja sitä pyörittävä sähkömoottori sekä turbiinianturit. Näiden komponenttien seurantaan on syytä kiinnittää erityistä huomiota, kun ajatellaan ennakoivaa kunnossapitoa [54].

3.1.2 Korkeapainejärjestelmä

Korkeapainejärjestelmän tarkoituksena on tuottaa testattavalle laitteelle riittävän suuri paine. Suurin tarvittava paine on noin 15 MPa. Tämä paine tuotetaan hammaspyöräpumpulla. Tilavuusvirtaus pysyttelee alle 40 L/min. Korkeapainejärjestelmä on myös yhdistetty suuritilavuuksiseen tankkiin, josta käytettävä neste pumpataan testilaitteelle.

Valmistajan antamien ohjeiden mukaan pienin pumpattava viskositeetti tulisi olla 10 mm²/s sekä nesteen puhtausluokitus 20/18/15, jotta tarvittava pumpun toimintakyky säilyy. Testilaitteistossa olevan nesteen viskositeetti on kuitenkin huomattavasti tätä pienempi. Tarvittava puhtaustaso sen sijaan saavutetaan helposti käytössä olevilla suodattimilla.

Korkeapainelinjastossa on vastaavanlainen suodatus, kuin matalapainejärjestelmässä. Tankissa olevassa imuletkussa on karkea suodatin ja itse linjastossa on $\beta_5 = 1000$ suodatusteholtaan oleva suodatin [16].

Riskikartoituksen myötä riskialttiimmiksi komponenteiksi nousi linjaston tilavuusvirtausta säättävä proportionaaliventtiili. Proportionaaliventtiilin avulla pumpulta tulevaa tilavuusvirtausta säädetään ohjaamalla osa tilavuusvirrasta takaisin tankkiin. Tämä ei ole kaikista energiatehokkain ratkaisu, mutta ilman taajuusmuuttajaa nykyisellä pumpulla ja moottorilla ei ole mahdollista säätää tilavuusvirtausta tarkasti.

3.1.3 Valumajärjestelmä

Valumajärjestelmä kerää testilaitteelta valuvat nesteet takaisin suodattimen kautta tankkiin. Pumppausjärjestelmää pyöritetään kiinteätilavuuksisella hammaspyöräpumpulla, jonka tuottama tilavuusvirtaus on noin 16 L/min. Kovin suuria vaatimuksia paineen tuotolle ei ole, koska tarkoituksena on vain kierrättää kaikki valunut neste takaisin tankkiin ja sen kautta käyttöön matala- ja korkeapainejärjestelmille.

Valumajärjestelmän hammaspyöräpumppua pyöritetään sähkömoottorilla ja tarvetta pyörintänopeuden säätöön ei ole. Käytön säätö tapahtuu nestepinnan tason mittarilla, jonka avulla saadaan signaali, kun pumppausta on syytä suorittaa.

Valumajärjestelmän suodatus on tehty valuma-altaassa olevalla karkeasuodattimella, sekä linjastoon sijoitetulla $\beta_{12} = 1000$ suodatusteholla olevalla suodattimella [16].

Riskialttiimmiksi komponenteiksi nousi riskikartoituksen yhteydessä järjestelmän pumppu sekä sitä ohjaava oikosulkumoottori.

3.1.4 Jäähdytysjärjestelmä

Hydrauliikkaneesteelle on oma erillinen suodatus- ja jäähdytyspiiri. Nestettä kierrätetään tankista vesikiertoiselle lauhduttimelle ja suodatinelementeille. Nesteen oikea lämpötila on tärkeää, jotta sen ominaisuudet pysyvät mahdollisimman tasaisina testattaessa laitteita. Nesteelle asetettu lämpötila-alue on 20 °C ja 30 °C välissä. Näin matala lämpötila-alue asettaa suuria vaatimuksia toimivalle jäähdytysjärjestelmälle.

Tärkein ominaisuus, jota jäähdytysjärjestelmän pumpulta vaaditaan, on sen tuottama tilavuusvirtaus. Mitä suurempi tilavuusvirtaus saadaan kuljetettua lauhduttimen läpi, sitä parempi on saavutettava jäähdytysteho. Järjestelmälle asetettu vaatimus tilavuusvirtauksesta on noin 230 L/min [16].

Riskikartoituksessa järjestelmästä nousi esille sen pumpppu ja moottori sekä lauhdutin. Lauhduttimen ongelmana on siinä käytettävä neste, joka tässä tapauksessa on järvivesi. Järviveden vaihteleva lämpötila sekä likaisuus tuovat haasteensa toimivan jäähdytysjärjestelmän rakentamiselle.

3.2 Voitelujärjestelmä

Voitelujärjestelmän tehtävänä on kuljettaa voiteluöljyä käytössä olevalle hammaspyörävaihteistolle. Voiteluöljyä kuljetetaan säiliöstä hammaspyöräpumpulla lauhduttimen ja suodattimen kautta vaihteistolle. Hammaspyöräpumpppua pyöritetään oikosulkumoottorilla.

Järjestelmän säätäminen tapahtuu turbiinivirtausmittarin ja erillisen voiteluvalvontayksikön avulla. Voitelu tapahtuu jaksottaisena, eli voitelua annostellaan tietyllä aikasyklillä [16].

Riskialttiimmiksi komponenteiksi nousi riskikartoituksen myötä linjastossa oleva turbiinivirtausmittari, öljynlauhdutin sekä järjestelmää pyörittävä pumpppu ja sen käyttövoimana toimiva moottori. Voitelujärjestelmän oikeanlainen toimivuus on tärkeää, sillä sen avulla suoritetaan voitelu vaihteistossa oleville laakereille. Mikäli voitelu pettää, hajoaa vaihteisto, eikä varalaitetta ole olemassa.

3.3 Sähköjärjestelmä

Laitteiston sähköjärjestelmä koostuu kahdesta sähkökaapista, oikosulkumoottoreista, antureista, taajuusmuuttajista sekä tietokoneesta ja sen ohjelmistosta ja tiedonkeruulaitteistosta. Koko sähköjärjestelmän päätehtävänä on toimia voiman tuottajana sekä valvovana ja ohjaavana järjestelmänä hydrauliikkajärjestelmille.

Tällä hetkellä laitteiston sähköjärjestelmää ei käytetä kunnonvalvonnassa, eikä sen komponenteille ole määritelty erikseen mitään muuta huolto-ohjelmaa kuin kalibrointi. Sähkökomponenttien luotettavuus on kuitenkin melko hyvä, koska niissä ei välttämättä ole kuluvia tai liikkuvia osia. Tärkeimmiksi seurattavaksi komponenteiksi sähköjärjestelmässä nousi oikosulkumoottorit, tiedonkeruulaitteisto ja eri anturit. Antureiden toimivuutta tarkastellaan tällä hetkellä kalibroimalla niitä säännöllisesti. Sen sijaan oikosulkumoottoreiden toimintaa ja kuntoa ei tällä hetkellä valvota millään tavalla.

Laitteiston käyttäjien antamien tietojen perusteella laitteen tiedonkeruulaitteistossa on ilmennyt melko paljon vikoja. Viat ovat ilmenneet esimerkiksi ohjelmiston pysähtymisenä tai muuna toimimattomuutena. Niiden korjaaminen on kuitenkin ollut melko yksinkertaista, sillä yleensä järjestelmän uudelleen käynnistäminen tai laitekorttien muistin alustaminen on korjannut vikatilanteet.

3.4 Hammaspyörävaihteisto

Vaihteisto koostuu kahdesta käytettävästä ja yhdestä käyttävästä akselistasta. Hammasvälitysten avulla oikosulkumoottorilta tuleva pyörintänopeus saadaan muutettua halutunlaiseksi. Oikosulkumoottorin pyörintänopeutta ohjataan suurella taajuusmuuttajalla, sillä pyörintänopeuden säätö on saatava portaattomaksi ja tehon tarve on yli 100 kW.

Hammaspyörävaihteiston ollessa suunniteltu vain tähän käyttötarkoitukseen, sille ei ole olemassa mitään varalaitetta, joten sen vikaantuessa koko tuotanto pysähtyy. Vaihteiston laakerit ovat vaihdettu hybridilaakereihin, jolloin niiden vierintäelementit ovat keraamisia. Tällä tavoin taajuusmuuttajaohjauksesta syntyviä laakerivirtoja on pyritty vähentämään, koska kulkureittiä virralle ei pääse syntymään laakereiden kautta [16].

4. VIKATILANTEIDEN TEORIA

Ennakoiva kunnossapito perustuu pitkälti siihen, että erilaiset vikaantumistilanteet saadaan kartoitettua etukäteen. Monissa teollisuudessa käytetyissä laitteissa järjestelmä koostuu useasta eri elementistä, kuten esimerkiksi hydraulikan ja pneumatiikan yhteistoiminnasta. Tietokoneiden laskentatehon lisääntyessä ja elektronisten komponenttien halventuessa myös sähköiset elementit, kuten tietokoneet ja ohjelmat ovat vallanneet hyvin ison osan laitteiden toiminnoista [1, s. 27].

Koneiden ja laitteiden monipuolistuessa myös mahdolliset vikatilanteet erilaistuvat. Erilaisten vikojen erottelu vain tiettyyn järjestelmään on käymässä haastavammaksi, sillä enenevissä määrin erilaiset järjestelmät sulautuvat toisiinsa. Toisaalta esimerkiksi automaation lisääntyessä koskettamaan eri järjestelmiä, on sen avulla mahdollista saada käyttäjälle ajantasaista tietoa laitteen toiminnasta. Näin ollen esimerkiksi laitteen vikaantuessa, käyttäjälle on mahdollista antaa viesti siitä, mikä osa-alue ei toimi oikein ja korjaaminen voidaan helpommin paikallistaa koskemaan oikeata osa-aluetta.

Koska teollisuuden laitteistojen kehittyminen on menossa siihen suuntaan, että varalaitteita ei ole ja järjestelmät ovat optimoidut toimimaan kapenevassa toimintaympäristössä tarkemman lopputuloksen tuottamiseksi, on automaation kehittyttävä tunnistamaan erilaisia häiriö- ja vikatilanteita [1, s. 30]. Kehittymisen myötä järjestelmien ja laitteiden valvontaan on kehitetty useita eri mittalaitteita ja standardeja, joiden avulla kunnossapitoa voidaan automatisoida. Nämä kaikki mittamenetelmät perustuvat kuitenkin samojen asioiden mittaamisen, joita on käytetty jo paljon ennen objektiivisten mittalaitteiden saamista subjektiivisissa mittauksissa laitteen kunnosta.

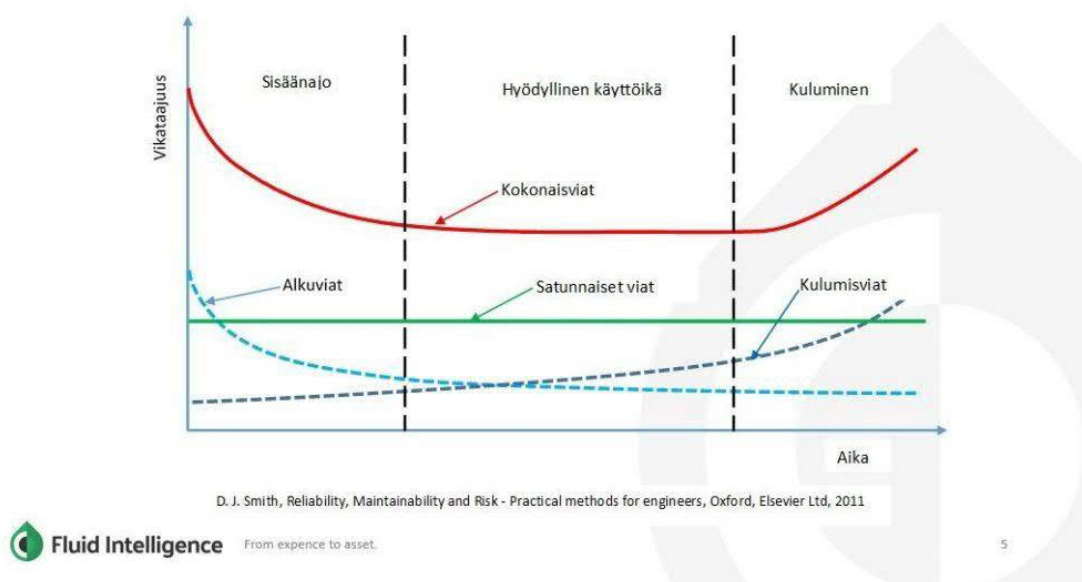
Laitteeseen ilmaantuneet häiriö- ja vikatilanteet eskaloituvat toiminnan muutoksena. Nämä muutokset voivat olla niin pieniä alkuun, että niitä on mahdotonta havaita pelkästään ihmisaistein. Esimerkiksi sähkömoottorin laakereiden toimintalämpötilojen muutos jo yhdellä asteella vaikuttaa merkittävästi sen odotettuun käyttöikänsä [2, s. 28]. Tästä syystä sähköisillä mittauksilla päästään tarkempaan ja huomattavasti ennakoivampaan asemaan suoritettaessa ennakoivaa kunnossapitoa.

Vika- ja häiriötilanteet voivat indikoitua useassa eri muodossa. Tyypillisimpiä tapoja ovat muun muassa: värinän lisääntyminen, toimintalämpötilan muutos, suorituskyvyn heikkeneminen, melun lisääntyminen, ulkonäön muuttuminen, välysten kasvaminen, painemuutokset, erilaiset vuodot sekä epätasainen laatu lopputuotoksessa [3, s. 35-50]. Lähes kaikkia näistä parametreista on mahdollista seurata joko aistinvaraisesti tai automaation avulla sähköisesti.

Syy miksi jokin komponentti tai laite vikaantuu, on hyvin monitahoinen. Halutuin käyttöiän päätös on luonnollinen ikääntyminen, jolloin komponentin oletettu elinikä on täyttynyt. Tällöin siihen on helpoin varautua jatkotoimenpiteiden osalta. On kuitenkin hyvin tavallista, että komponentit eivät saavuta oletettua elinikäänsä, johtuen muuttuneista käyttöolosuhteista, tai niille ei sellaista ole laskettu lainkaan. On kuitenkin mahdollista arvioida vikaantumistiheyttä MTTF:ää (**M**ean **T**ime **T**o **F**ailure) keräämällä pitkäaikaista käyttödataa vikaantumisväleistä. Tähän dataan sisältyy jo valmiiksi tieto myös käytönaikaisista olosuhteista ja niiden vaikutuksesta komponentin elinikään, mikäli ne pysyvät lähes staattisina laitteen käyttöiän ajan [4, s. 42].

Laitteen vikaantumistiheyteen vaikuttaa useampi eri tekijä. Tyypillisimpiä esimerkkejä ovat ympäristöolosuhteisiin liittyvät tekijät, kuten kosteuden lisääntyminen tai lämpötilamuutokset. On olemassa myös elementtejä, jotka eivät suoranaisesti ole hallitsemattomia ympäristöstä tulevia riskitekijöitä. Näitä ovat muun muassa käyttäjän ja asentajan tai huoltajan aiheuttamat tilanteet, joissa komponenttien elinikä saattaa laskea. Tällaisia tilanteita voivat olla esimerkiksi iskut komponentteihin, laitteen ylikuormittaminen, asennusvirheet tai staattisen sähkön purkautuminen asentajasta [4, s. 40-41].

Tyypillisesti laitteen vikaantumistiheys noudattaa alla olevan kuvan (Kuva 26) määrittämää käyrää:



Kuva 26. Tyypillinen laitteiston vikaantumiskäyrä "ammekäyrä" [5]

Yllä olevasta kuvasta voidaan nähdä millä tavoin tyypillisesti laitteiden vikaantumistiheys käyttäytyy. On oletettavaa, että laitteistoa otettaessa käyttöön, vikoja esiintyy tavallista käyttöä enemmän, sillä tällöin tulee ilmi monia suunnittelussa huomiotta jääneitä asioita. Kun laitteistosta on saatu korjattua nämä puutteet, alkaa

koneen normaalikäyttö. Normaalikäytön aikana kulumisesta aiheutuneita vikoja syntyy enemmän mitä suurempi laitteen käyttöikä on. Tämä noudattaa keskimäärin lineaarista käyrää, jolloin vikojen ennustaminen on kohtuullisen helppoa.

Laitteen elinkaaren tullessa loppuun vikojen määrä alkaa nousta huomattavasti. Tässä vaiheessa on syytä miettiä joko peruskorjausta tai uuden laitteen hankintaa, sillä tarkkaa vikaantumistiheyttä on huomattavasti haastavampi ennustaa, koska eri komponentit ovat kuluneet eri tavalla.

Seuraavien alaotsikoiden alla on jaoteltu tyypillisimmät järjestelmät ja niiden vikaantumistilanteet teollisuuslaitteistoissa. Tarkempana tarkastelukohteena on otettu työn aiheena toimiva järjestelmä, joka koostuu näistä eri osajärjestelmistä. Jokaisessa alaotsikossa käsitellään näihin liittyviä vikaantumisen syitä, eri vikatilanteita sekä hieman sitä mitä vikatilanne saattaa aiheuttaa ja miten se mahdollisesti ilmenee laitetta käytettäessä.

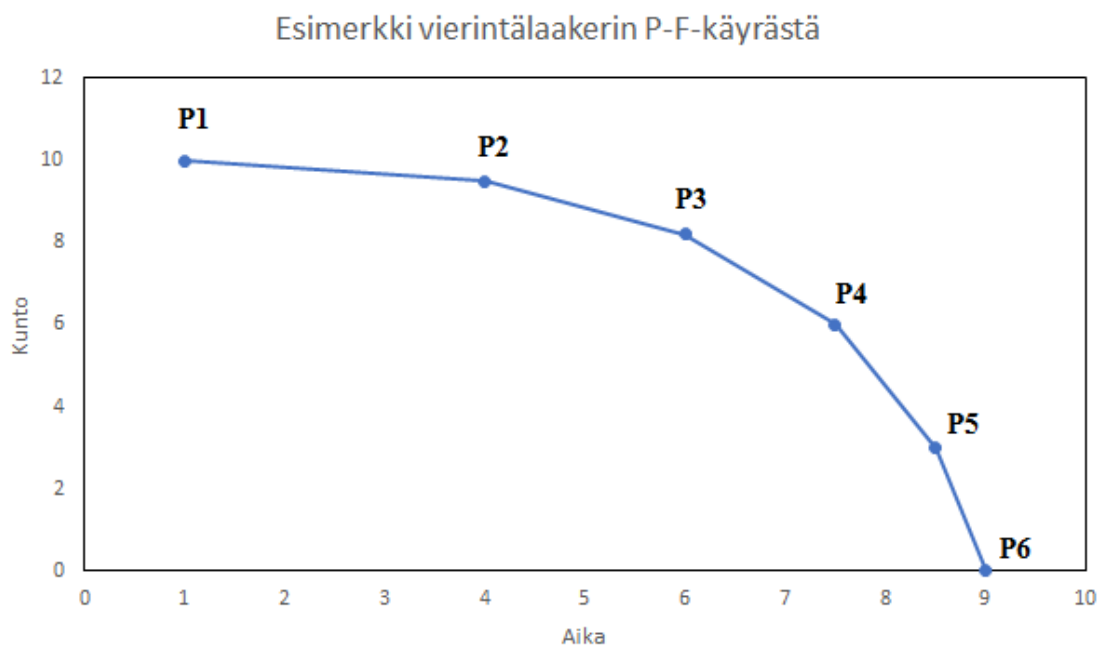
4.1 Mekaaniset viat

Mekaaniset viat ovat yleisyydeltään suurimpia, sillä ne koskettavat lähes kaikkia laitteita ja komponentteja, joita teollisuudessa käytetään. Ainoastaan ohjelmalliset viat voidaan pois lukea tästä ryhmästä. Mekaanisia vikatyyppejä on myös montaa erilaista, kuten esimerkiksi kulumisesta johtuvat, asennusvirheet tai linjausvirheet.

Tärkeimpänä seurattavana tekijänä kunnossapidon kannalta on kulumisesta johtuvat häiriöt, sillä nämä edustavat yllä esitettyssä kuvassa (Kuva 26) esitettyjä normaalin käytönaikaisia vikatilanteita. Seuraamalla komponentin kulumista on mahdollista päätellä missä vaiheessa sen elinkaarta ollaan menossa. Tämä johtuu siitä, että varsinaista kulumista tapahtuu lähes komponentin elinkaaren alusta asti, mutta kulumisen johtaminen varsinaiseen vikaantumiseen kestää jonkin aikaa. Niinpä seuraamalla eri kulumisen ilmaisevia parametreja on mahdollista saavuttaa komponentille maksimaalinen käyttöikä, sen kuitenkin vaarantamatta itse järjestelmää aiheuttamalla vikatilanteita.

4.1.1 P-F-käyrä

Komponenttien vikaantumista ja kulumista kuvataan P-F-käyrällä (**P**oint to **F**ailure), joka kuvastaa komponentin kuntoa eri ajan hetkillä. P-F-käyrästä on mahdollista nähdä, millaisia muutoksia komponentin toiminnassa tapahtuu, kun vikaantuminen alkaa. Kuva 27 kuvastaa teoreettisen tilanteen vierintälaakerin P-F-käyrästä [1, s. 141].



Kuva 27. Teoreettinen P-F-käyrä vierintälaakerille

Kuva 27 kuvaa vierintälaakerin toimintamuutoksia pisteittäin sen vikaantuessa. Kuvatut toimintapisteet ovat selvennetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 2):

Taulukko 2. Kuva 27 toimintapisteiden selitykset [1, s. 141]

TOIMINTAPISTE	OIREET
P1	Vikaantuminen alkaa
P2	Muutoksia värähtelyssä P-F jakso 1-9 kk
P3	Partikkeleita öljyanalyysissa P-F jakso 1-6 kk
P4	Korvin kuultavaa melua P-F jakso 1-4 vko
P5	Kosketuksella havaittavaa lämpöä P-F jakso 1-5 pv
P6	Vikaantuminen tapahtuu

Yllä olevasta taulukosta (Taulukko 2) on havaittavissa, että esimerkkinä olleesta vierintälaakerista on mahdollista havaita vikaantumisen merkkejä jo paljon ennen kuin todellinen vikaantuminen tapahtuu. Esimerkiksi mittaamalla laakerin värähtelyä on mahdollista saada selville vikaantuminen jo todella aikaisessa vaiheessa. Tällöin sen korjaamiseen voidaan varautua hyvissä ajoin ja kalliilta tuotannon pysähdyksiltä on mahdollista välttyä.

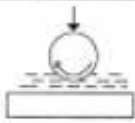
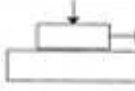

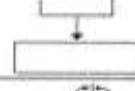
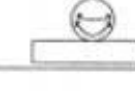
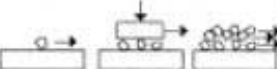





Mikäli jokaisen komponentin P-F-käyrä tunnettaisiin tarkoin, olisi ennakoiva kunnossapito erittäin optimaalinen. Tällöin voidaan olettaa, että lähes kaikkiin vikatilanteisiin voitaisiin varautua. Käyrän avulla voitaisiin myös optimoida tarvittavien suureiden mittaaminen sekä kuinka lyhyellä sekvenssillä komponenttia tulisi mitata [1, s. 140-141].

4.1.2 Kulumismekanismit

Mekaaninen kuluminen voidaan luokitella eri tyyppeihin usealla eri tavalla. Yksi kulumistyyppien luokittelutapa on DIN 50320 standardin mukainen. Kyseisessä standardissa kulumismekanismit luokitellaan neljään eri kategoriaan:

- Adhesiivinen
- Abrasiivinen
- Väsyminen
- Tribokemiallinen kuluminen

On olemassa myös muita tapoja luokitella kulumismekanismit, mutta DIN 50320 standardin mukainen luokittelu on hyvin yksinkertainen ja kattava. Alla olevassa kuvassa (Kuva 28) on tarkemmin käyty läpi eri kulumismekanismit sekä niiden syntyminen.

Systeemin rakenne	Kulumisen aiheuttava rasitustyyppi	Kulumis-tyyppi	Kulumismekanismi			
			Adheesio	Abrasio	Pinnan väsyminen	Tribo-kemiallinen
Kiinteiden pintojen välissä voiteluaine	Liukuminen Vierintä Isku Sysäykset 				X	X
Kiinteät pinnat toisiaan vasten	Liukuminen 	Liukumis-kuluminen	X	X	X	X
	Vierintä 	Vierintä-kuluminen	X	X	X	X
	Iskukuormitus 	Isku-kuluminen	X	X	X	X
	Värähtely 	Värähtely-kuluminen	X	X	X	X
Kiinteät pinnat ja kulumispartikkeli	Hionta 			X		
Kiinteät pinnat ja partikkelit	Partikkeli-suihku 	Eroosio		X	X	X
Kiinteä pinta ja kaasu	Virtaus 	Kaasu-eroosio				X
Kiinteä pinta ja neste	Virtaus Värähtely 	Kavitaatio			X	X
	Virtaus Isku 	Pisara-eroosio			X	X
Kiinteä pinta ja nesteessä kuluttavia partikkeita	Virtaus 	Eroosio		X	X	
		Korroosio-eroosio		X	X	X

Kuva 28. Kulumismekanismit eri tilanteiden mukaan [6, s. 6]

DIN 50320 standardin avulla saadaan luokiteltua melko kattavasti erilaiset kulumista aiheuttava tilanteet, kuten yllä olevasta kuvasta (Kuva 28) on havaittavissa. Seuraavissa alakappaleissa on lisäksi vielä lyhyesti selvitetty hieman, mitä kyseiset kulumismekanismit tarkoittavat ja millaisissa oloissa niitä on mahdollista havaita.

4.1.2.1 Adhesiivinen kuluminen

Adhesiivisella kulumisella tarkoitetaan sitä kulumismekanismia, joka tapahtuu, kun kaksi kappaletta osuvat ja hankautuvat toisiaan vasten. Tällöin kuluminen tapahtuu, kun kappaleiden pinnankarheudesta johtuvat huiput hankaavat toisiaan vasten ja kitkalämmön

vaikutuksesta kappaleet hitsautuvat toisiinsa. Lopulta kitkaliitos repeää, jolloin kappaleista irtoaa materiaalia.

Adhesiivista kulumista esiintyy usein aluksi tilanteissa, joissa kappaleiden välinen voitelukyky on pettänyt. Tällaista voi siis esiintyä esimerkiksi laakereissa, joissa ei ole riittävää voitelua. Kulumisen vähentämiseksi voidaan parantaa voitelukykyä tai hienontaa kappaleiden pintoja [6, s. 7-8].

4.1.2.2 Abrasiivinen kuluminen

Abrasiivista kulumista tapahtuu silloin, kun kappaleiden välissä on hiovia partikkeleita. Tämä on hyvin normaali kulumisen muoto, jota muun muassa hydraulikkajärjestelmissä pyritään estämään järjestelmässä sijaitsevilla suodattimilla.

Adhesiivinen kuluminen monesti muuttuu abrasiiviseksi, sillä kappaleiden väliin irtoaa partikkeleita, jotka hiovat kappaleita [6, s. 8-9].

4.1.2.3 Väsyminen

Väsymiskuluminen tapahtuu ilman mekaanista kosketusta. Se syntyy, kun kappaleeseen kohdistuu vaihtelevaa mekaanista kuormitusta. Materiaalin kohdatessa vaihtelevaa puristusjännitystä tai leikkausjännitystä se alkaa hiljalleen myötämään. Tämä johtaa lopulta plastisiin muodonmuutoksiin kappaleissa, joka monesti ilmenee esimerkiksi säröilyinä.

Väsymiskulumista ilmenee yleisimmin vierintälaakereissa ja hammaspyörissä. Kulumisen estämiseksi ja vähentämiseksi voidaan joko vähentää kuormitusta, vaihtaa voiteluainetta tai muokata kappaleiden pintakäsittelyä [6, s. 9-10].

4.1.2.4 Tribokemiallinen kuluminen

Tribokemiallisessa kulumisessa kappaleen pinnalle muodostunut reaktiokerros kuluu suhteellisen liikkeen seurauksena. Tällaista kulumista tapahtuu muun muassa metallipintojen hapettuessa, värähtelyssä tai kavitaation seurauksena [7, s. 23].

Kulumista voidaan ehkäistä oikeilla materiaalivalinnoilla, järjestelmän oikealla toiminnalla tai pinnoitusmenetelmillä.

4.1.3 Laakereiden vikaantuminen

Mekaanisten vikaantumisten yksi suurimmista esiintymiskohdista on laitteistoissa olevissa laakereissa. Teollisuudessa on hyvin vähän laitteita, joista ei löytyisi laakereita. Lisäksi laakereiden vikaantuessa yleensä koko järjestelmä on käyttökelvoton ennen laakereiden uusimista.

Laakerivaurioita voidaan luokitella eri tyyppeihin riippuen sen syntymekanismista. ISO 15243:2004 standardi on yksi luokittelutavoista erilaisille vauriotyypeille. Se jakaa

laakerivauriot kuuteen pääryhmään ja ne vielä tarkemmin 16 alaryhmään. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 3) on esitetty ISO standardin mukainen jaottelu

Taulukko 3. ISO 15243:2004 mukainen laakerivaurio jaottelu [2, s. 298]

PÄÄRYHMÄ	ALARYHMÄ
Materiaalin väsyminen	<i>Pinnanalainen väsyminen</i>
	<i>Pinnan väsyminen</i>
Kuluminen	<i>Abrasiivinen kuluminen</i>
	<i>Adhesiivinen kuluminen</i>
Korroosio	<i>Kosteuskorroosio</i>
	<i>Kitkakorroosio</i>
	<i>Sovitekorroosio</i>
	<i>Tärinävaurio</i>
Sähköeroosio	<i>Suuri jännite</i>
	<i>Laakerivirrat</i>
Plastinen muodonmuutos	<i>Ylikuormitus</i>
	<i>Epäpuhtauspartikkelien aiheuttamat painaumat</i>
	<i>Virheellisen käsittelyn aiheuttamat painaumat</i>
Murtuma ja säröily	<i>Pakotettu murtuma</i>
	<i>Väsymismurtuma</i>
	<i>Lämpömutuma</i>

Selvittämällä laakerivaurion syntymekanismi, on sen uusiutuminen huomattavasti helpompi ennaltaehkäistä. Esimerkiksi sähköeroosion synnyttämät laakerivauriot voidaan estää vain estämällä sähkövirran ja jännitteen kulku laakereiden kautta, joko muokkaamalla jännitetasoja tai eristämällä laakereita.

Laakerivauriot voidaan jaotella myös niiden syntymisajankohdan mukaan kahteen luokkaan:

- Vauriot, jotka syntyvät ennen käyttöä
- Käytön aikana aiheutuvat vauriot

Vauriot, jotka aiheutuvat ennen käyttöä on suurena osallisena inhimillinen tekijä. Tähän vaikuttavat niin laitteen asennuksen kuin myös kuljetuksen suorittaja. Tällaisia vaurioita ovat muun muassa [2, s. 298]:

- Laakerin virheellinen asennustapa
- Kuljetus-, käsittely- ja varastointitavat
- Akselin staattinen linjausvirhe
- Virheelliset sovitteet laakerille ja akselille

Käytön aikaisiin vaurioihin pystytään paremmin vaikuttamaan hyvällä suunnittelulla, sekä oikeaoppisella käytöllä. Tällaisia vauriomekanismeja ovat muun muassa [2, s. 298]:

- Materiaalin väsyminen
- Voitelukyvyn pettäminen
- Tärinävauriot
- Dynaaminen linjausvirhe
- Sähkövirran kulkeminen laakerin kautta
- Virheellinen käyttö/ käyttöolosuhteet

Ennakoivan kunnossapidon kannalta tärkeämmäksi nousee käytönaikaiset vaurio-tilanteet. Näitä vauriomekanismeja valvomalla on mahdollista saavuttaa tilanne, jossa vaurioitunut laakeri ennätetään uusimaan ennen täydellistä konerikkoa.

4.1.4 Laakerivaurion tunnistaminen

Kunnossapidon kannalta on ensiarvoisen tärkeää osata tunnistaa vikaantumiseen johtaneet juurisyyt. Näin voidaan ennaltaehkäistä tulevia tuotannon pysäytyksiä sekä parantaa koneen käyttövarmuutta. Laakereiden kohdalla vikaantumisyyt voidaan paikallistaa esimerkiksi ISO 15243:2004 standardin mukaisen jaottelun avulla.

Laakereiden vaurioitumisyyt voidaan karkeasti jakaa kuten Kuva 29 esittää.



Kuva 29. Vierintälaakereiden vaurioitumiseen johtaneet syyt [9, s. 11]

Yllä olevasta kuvasta (Kuva 29) on luettavissa, että tärkein syy laakereiden vaurioitumiseen löytyy voiteluaineesta. Yhteensä noin 75% vaurioon johtaneista vioista voidaan laskea johtuneen voiteluaineesta. Tämän vuoksi kunnossapidon kannalta on todella tärkeää olla tietoisia voiteluaineen riittävydestä ja käytönaikaisesta kunnosta. Vierintälaakerin vaurioitumistaulukkoon (ks. Liite A: vierintälaakerin vaurioitumistaulukko) on koottu tarkempi kuvaus erilaisista vaurioitumissyistä ja niiden esiintymistavoista ja -kohdista [9, s. 12-13]. Taulukosta on syytä nostaa esiin, että yleisin kohta, jossa vaurioituminen näkyy, on laakerin sisällä pyörivien elementtien kosketuskohdissa. Tämä vaikeuttaa ulkopuolisen tarkastelun luotettavuutta, sillä on haastavaa nähdä tämän tyyppinen vaurioituminen purkamatta rakenteita.

Kun laakeri on vaurioitunut ja se vaihdetaan uuteen, on syytä tarkastella vaurioitunutta laakeria lähemmin. Tarkastelulla voidaan havaita vikaantumiseen johtaneet syyt ja tämän avulla suorittaa ennakoivaa kunnossapitoa uutta laakeria ajatellen. Alla on lueteltu ISO 15243:2004 vaurioiden tyypillisiä oireita ja niiden estämiseen soveltuvia ratkaisuja.

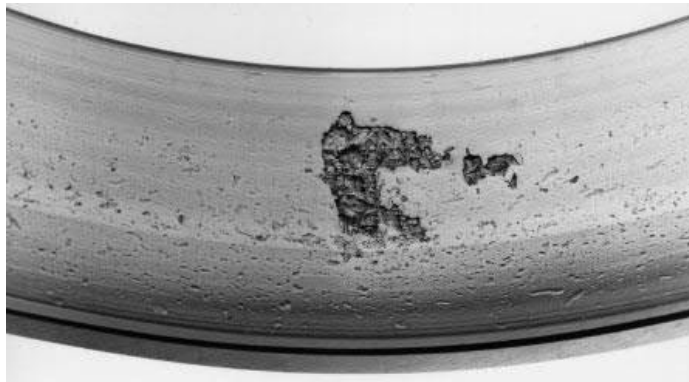
4.1.4.1 Materiaalin väsyminen

Materiaalin väsymistä syntyy, kun laakerin kontaktipintoihin kohdistuu vaihtelevaa ja toistuvaa kuormitusta. Väsyminen on yleensä silmännähtävää säröilyä vierintäelimissä, eli joko kuulissa, sisäkehän urassa tai ulkokehän urassa.

Alla olevissa kuvissa näkyy tyypillisimpiä oireita, joita laakereissa ilmenee, kun sen materiaali väsyi:



Kuva 30. *Laakerin sisäkehän väsymisvaurio [9, s. 28]*



Kuva 31. *Laakerin ulkokehällä näkyvä väsymisvaurio [9, s. 28]*

Kuva 30 ja Kuva 31 esittävät tyypillistä materiaalin väsymisvauriota. Materiaalin pintaan muodostuu selkeitä plastisia muodonmuutoksia, joko säröilynä tai materiaalin irtoamisena.

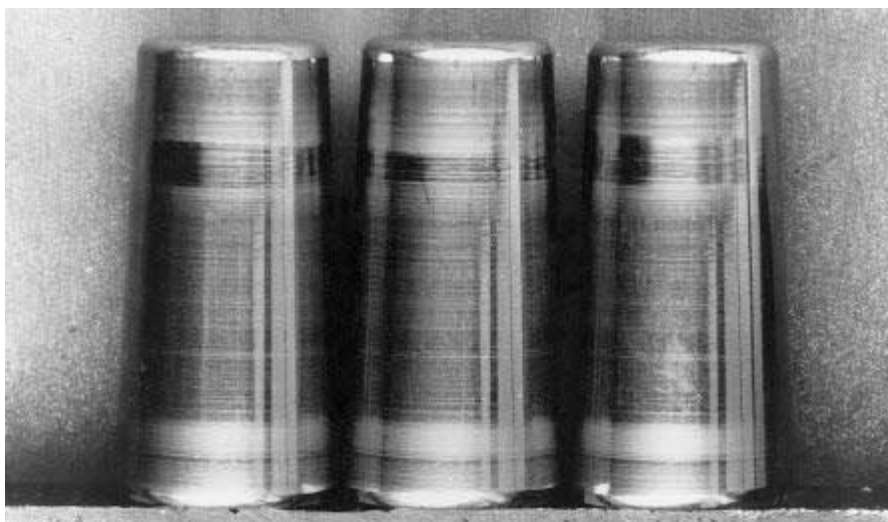
Väsymisen estämiseksi on syytä tarkistaa laakerin sovite laakeripesään, kuormitusolosuhteet, voiteluaineen voitelukyky tai uusia laakeri toisen tyyppiseen laakeriin, jolla väsymiskestävyys on suurempi [10, s. 8] [11, s. 6].

4.1.4.2 Kuluminen

Kulumista tapahtuu laakerissa, kun kaksi pintaa reagoivat keskenään. Kulumistyyppit voidaan edellä olleen jaottelun mukaan (4.1.2) jakaa laakeripinnoissa myös abrasiiviseen ja adhesiiviseen kulumiseen. Yleensä kuluminen näkyy ensimmäisenä vierintäelementtejä koossa pitävässä häkissä, koska tämä on heikompa materiaalia kuin sisä-/ulkokehä tai vierintäelementit. Seuraavaksi kuluminen näkyy vierintäelementeissä, eli kuulissa tai rullissa.

Voitelukyvyyn pettäminen tai vieraspartikkelipitoisuus voiteluaineessa on hyvin yleinen syy laakereiden kulumiseen. Laakereissa on mahdollista nähdä joko kiillottumista tai pieniä naarmuja. Mikäli naarmut ovat tunnettavissa esimerkiksi kynnellä kokeilemalla on laakeri uusittava [11, s. 128].

Alla olevassa kuvassa (Kuva 32) on tyypillisimpiä oireita, joita näkyy, kun laakerissa tapahtuu kulumista:



Kuva 32. Vierintälaakereiden rullissa kuluminen voi näkyä naarmuina [9, s. 42]

Kulumisen vähentämiseksi on syytä keskittyä ensisijaisesti voiteluaineeseen. Voiteluaine voidaan vaihtaa sellaiseen, joka kestää suurempia kuormituksia esimerkiksi suurentamalla viskositeettia tai voiteluaineen vaihtoväliä pienentämällä. Mahdollisia ratkaisuja ovat myös voiteluaineen tarkempi suodattaminen, tiivistyksen parantaminen tai laakerin vaihtaminen kestävämpään esimerkiksi häkin osalta [9, s. 41-42] [11, s. 128].

4.1.4.3 Korroosio

Korroosio on helposti havaittavissa punaisena tai ruskeina alueina laakeripinnoilla (ks. Kuva 33). Sitä syntyy, kun laakeri altistuu kosteille olosuhteille tai kemikaaleille, jotka edistävät korroosiota. Korroosio aiheuttaa yleensä värähtelyn lisääntymistä, mikä lisää laakerin kulumista ja johtaa useimmiten lopulta materiaalin väsymiseen [10, s. 12].



Kuva 33. Korroosion aiheuttamat ongelmat ovat helposti havaittavissa värin perusteella [11, s. 129]

Korroosion estämiseksi on syytä tarkastaa laakerin toimintaolosuhteet, parantaa tiivisteitä ja varmistaa, että voiteluaine on sopiva olosuhteisiin nähden.

4.1.4.4 Sähköeroosio

Sähköeroosio johtuu laakerin yli olevasta jännitteestä ja sen myötä virran kulkemisesta laakerin läpi. Varsinkin nykyaikaisissa taajuusmuuttajaohjatuissa sähkömoottoreissa laakereiden läpi voi ilmentyä sähköeroosiosta johtuvia oireita. Tämä johtuu siitä, että taajuusmuuttajan kytkentänopeus IGBT-transistoreilla on niin nopeaa, mikä aiheuttaa nopeataajuisen jännitepulssin. Lisäksi PWM- ohjaus, joka edellyttää vaihtovirran tasasuuntaamisen ja uudelleen vaihtosuuntaamisen tuottaa ongelman neutraalijännitteeseen, joka ei ole nolla, kuten sen pitäisi olla [12, s. 6].

Sähköeroosion syntymistä voidaan havaita erilaisten sähköisten suureiden mittaamisella esimerkiksi staattorivirran symmetrisyysmittauksin tai värähtelymittauksin [12][13][14]. Kyseistä ongelmaa on tarkasteltu tarkemmin kappaleessa 4.4 alla.

Kuva 34 ja Kuva 35 kuvastavat oireita, joita sähköeroosio synnyttää laakereissa:



Kuva 34. Sähköeroosion aiheuttamaa ”pyykkilautakuviota” laakerin ulkokehällä [9, s. 38]



Kuva 35. Ylijännitteen aiheuttamaa kraateroitumista rullalaakerin rullassa [11, s. 131]

Sähköeroosiota voidaan estää esimerkiksi kiinnittämällä huomiota moottorin maadoitusjohdinjärjestelmään, suunnittelemalla mahdollisimman lyhyt ja pieni-impedanssinen virran paluureitti vaihtosuuntaajalle, sekä pitämällä huolen, että maapotentiaalierot eivät ole liian suuria vaihtosuuntaajan ja moottorin eri maatasojen välillä tai moottorin ja esimerkiksi vaihteiston välillä ei ole liian suurta maapotentiaaliero [12, s. 15-17].

4.1.4.5 Plastinen muodonmuutos

Plastisia muodonmuutoksia syntyy, kun materiaalin myötöraja ylittyy kuormituksen osalta. Yleisimmät syyt plastisille vaurioille löytyvät käyttäjistä tai laakerin asentajista. Tyypillisimpiä vaurion aiheuttajia ovat ylikuormituksesta johtuvat shokkikuormitukset, asennusvirheet tai käsittelyssä tapahtuneet virheet.



Kuva 36. *Laakerin asennuksessa tapahtunut plastinen muodonmuutos [11, s. 132]*

Jotta välttyttäisiin plastisen muodonmuutoksen aiheuttamilta ongelmilta, on laakereita aina kohdeltava huolella. Lisäksi asennettaessa niitä paikoilleen on varmistuttava oikeasta työtavasta.

4.1.4.6 Murtumat ja säröily

Murtumia ja säröilyä syntyy yleisimmin kovakouraisen käsittelyn myötä, joko asennuksen tai irrotuksen yhteydessä. Tällöin materiaalin murtolujuus on ylittynyt ja se repeää. Säröilyä voi myös syntyä lämmön ja väsymisen myötä. Lämmön myötä ilmaantuvat säröt ovat syntyneet, kun laakerissa tapahtuu liikaa liukumista. Liukuminen synnyttää kitkan myötä lämpöä, joka johtaa laakerin murtumiseen



Kuva 37. *Laakerin sisäkehässä oleva aksiaalinen halkeama [9, s. 40]*

Murtumia voidaan estää parantamalla voiteluainetta, jolloin liukumista ja lämpenemistä tapahtuu vähemmän, valitsemalla oikean kokoinen laakeri käyttötarkoitukseen, lämpökäsittelemällä sekä varmistumalla oikeista työmenetelmistä käsiteltäessä laakereita.

4.1.5 Erilaisten tekijöiden vaikutus laakerin elinikään

Laakerin odotettuun elinikään vaikuttaa useampi eri tekijä. Näitä tekijöitä pyritään optimoimaan laakerikäyttöä suunniteltaessa niin, että mahdollisimman moni laakeri

saavuttaisi halutun eliniän. Merkittävimpiä laakerin käyttöikään vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa:

- Voiteluaineen voitelukyky
- Ympäristön epäpuhtaudet
- Akselin ja laakerin linjaus
- Kuormitustyyppi ja -taso
- Pyörintänopeus
- Lämpötila
- Tärinätaso

Nämä tekijät huomioon otettaessa on mahdollista saavuttaa laakerille maksimaalinen käyttöikä.

Laakereita suunniteltaessa niiden odotettu elinikä voidaan laskea kaavan 1 avulla

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (1)$$

jossa L_{10} = kestoikä (90 % varmuudella) [miljoonaa kierrosta]

C = dynaaminen kantavuusluku [kN]

P = ekvivalenttikuormitus [kN]

p = kestoikäkaavan eksponentti, 3 kuulalaakerilla ja 10/3 rullalaakerille

SKF antaa kuitenkin laakerineliniälle hieman tarkemman määrittelytavan, jolla voidaan ottaa huomioon myös laakerin käyttöolosuhteista johtuvat tekijät [2, s. 28].

$$L_{nm} = a_1 a_{SKF} \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (2)$$

jossa L_{nm} = SKF-laakerin kestoikä [miljoonaa kierrosta]

a_1 = käyttöiän säätökerroin

a_{SKF} = SKF-käyttöikä kerroin

C = dynaaminen kantavuusluku [kN]

P = ekvivalenttikuormitus [kN]

p = kestoikäkaavan eksponentti, 3 kuulalaakerilla ja 10/3 rullalaakerille

Käyttämällä kaavaa 2 voidaan laakerin käyttöikää ennustaa tarkemmin, kun sen käyttöolosuhteet tiedetään. Alla on tehty esimerkkilaskelmia diplomityön aiheena

olevaan laitteeseen ja siinä oleviin sähkömoottorin laakereihin. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 4) on listattu laakerin tärkeimmät tiedot laskelmien tekemiseksi.

Taulukko 4. Esimerkkilaskelmissa käytetyn laakerin tiedot

Laakerityyppi	E2.6206-2Z/C3, Urakuulalaakeri
Radiaalikuorma	1,4 kN
Aksiaalikuorma	0,1 kN
Dynaaminen kantavuusluku	19,5 kN
Maksimipyörimisnopeus	2980 rpm
Odotettu elinikä	15 100 -26 000 h

Jotta laakerin ekvivalenttikuormitus saadaan tietoon, on aluksi laskettava sille aiheutuvat radiaali ja aksiaalikuormitukset. Kaavalla 3 saadaan laskettua kuormitus, joka syntyy laakerille, kun akseli pyörittää vaihteistoa.

$$K_t = \frac{19,1 \cdot 10^6 \cdot H}{D_p \cdot n} \quad (3)$$

jossa K_t = tangentialinen kuormitus vaihteelle [N]

H = vaihteistolle välittyvä teho [kW]

D_p = vaihteiston rattaan halkaisija [mm]

n = pyörimisnopeus [rpm]

Vaihteiston geometrian avulla voidaan laskea voiman jakautuminen aksiaalivoimiin ja radiaalivoimiin. Todellisen voiman määrittämiseen on kuitenkin syytä käyttää korjauskerrointa, joka riippuu käytettävästä laitteesta ja sen aiheuttamasta iskumaisista voimasysäyksistä. Koska käyttöympäristönä toimii epätahtikone, voidaan korjauskertoimenä käyttää lukua 1,2 [8]. Tällöin todellinen kuormitus saadaan Kaavan 4 avulla.

$$K = f_w \cdot K_c \quad (4)$$

jossa K = todellinen akselin kuormitus [N]

f_w = kuormituskerroin 1,2

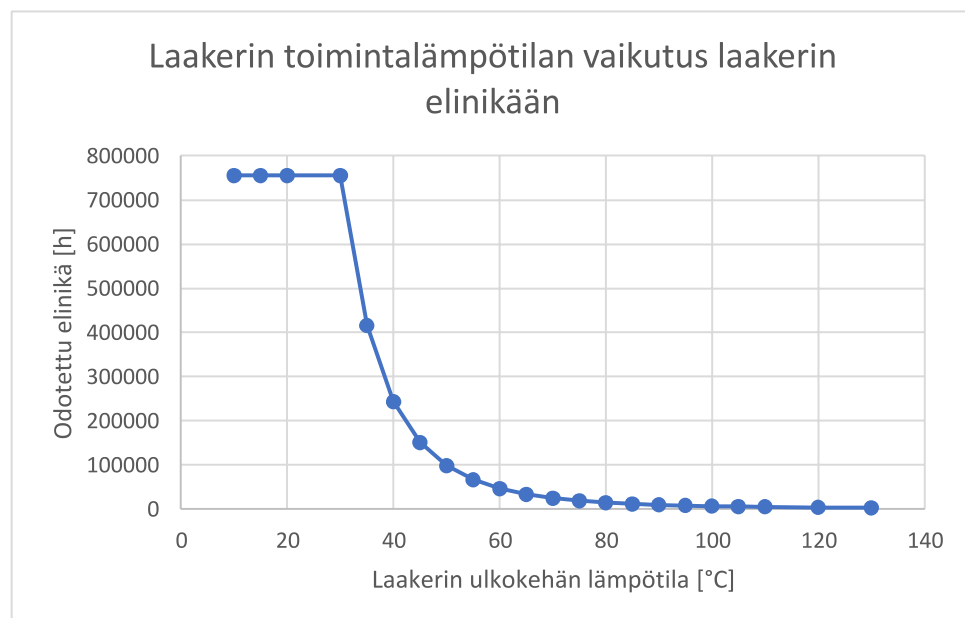
$$K_c = \text{laskettu teoreettinen arvo [N]}$$

Yksinkertaistamisen ja työn luonteen vuoksi tarkkoja suorituskykyarvoja ei käydä läpi tässä yhteydessä. Tärkeämpänä pointtina on käyty läpi kyseiselle laakerille aiheutuvat eliniän muutokset, kun sen toimintaolosuhteet muuttuvat. Laskelmat on suoritettu hyväksi käyttäen SKF Bearing Calculator ohjelmaa [15].

4.1.5.1 Toimintalämpötilan vaikutus laakerin elinikään

Laakerin ulkokehän lämpötilan muutos on yksi isoimmista tekijöistä, joka vaikuttaa odotettuun elinikään. Tietyllä välillä 1°C muutos vaikuttaa jopa tuhansia käyttötunteja.

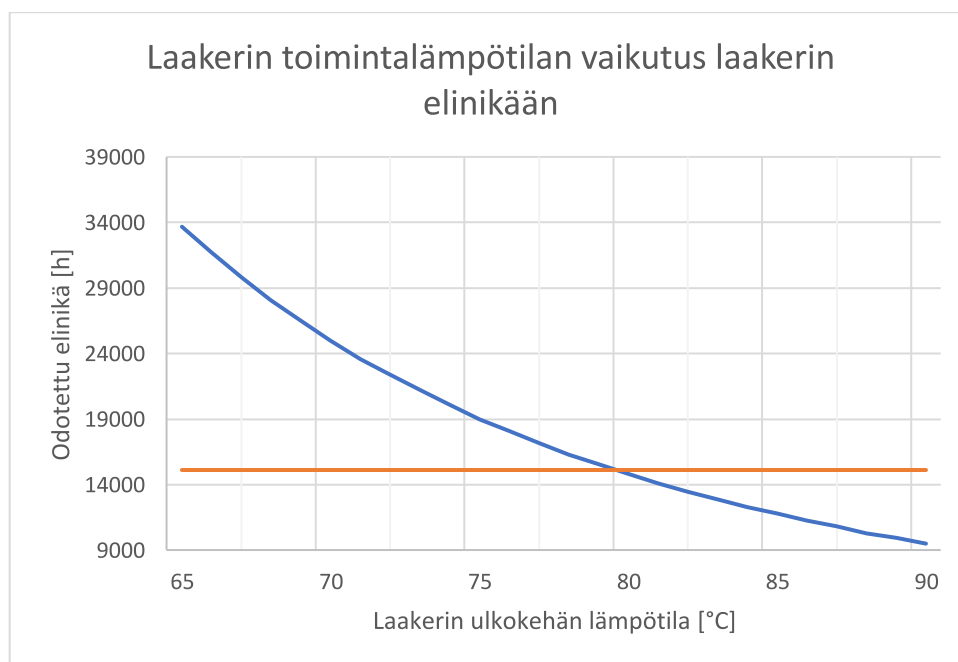
Alla olevassa taulukossa on käyty läpi laajalla skaalalla laakerin toimintalämpötilan vaikutus elinikään, kun muut tekijät pysyvät vakioina. Oletuksena on tehty, että sähkömoottori tuottaa lähes koko tehonsa ja pyörii maksiminopeudellaan.



Kuva 38. Toimintalämpötilan vaikutus laakerin käyttöikään

Yllä olevasta kuvasta (Kuva 38) on nähtävissä, että toimintalämpötila vaikuttaa elinikään erittäin suuresti, kun lämpötila on 30°C ja 60°C välissä. Yleisimmin laakerin ulkokehän toimintalämpötilat ovat noin 80°C tietämillä, mikäli kyseessä on täysin ilmajäähdytetty sähkömoottori [18]. Toimintalämpötilat vaihtelevat hieman riippuen käyttökohteesta.

Tarkempi tarkastelu toimintalämpötilan alueella (65°C - 90°C) kuvastaa hieman paremmin sitä, kuinka tärkeää on pitää huoli siitä, että moottorin jäähdytys toimii oikein.

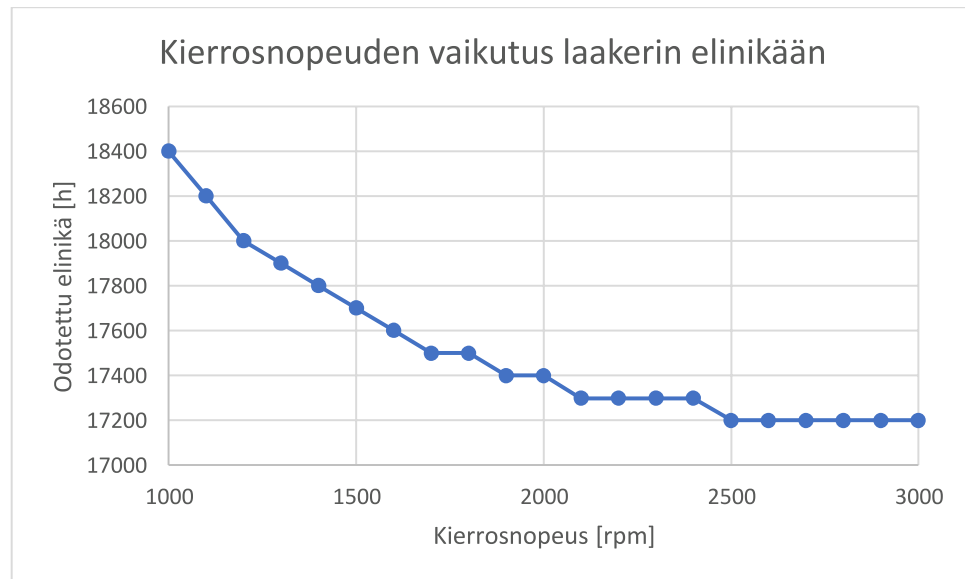


Kuva 39. Todellisen toimintälämpötilan vaikutus laakerin elinikään

Yllä olevasta kuvasta (Kuva 39) voidaan havaita jäähdytyksen tärkeys, kun ajatellaan laakerin käyttöikää. Alentamalla toimintälämpötilaa 80°C:sta 75°C:seen saavutetaan noin 5 000 käyttötunnin lisäys. Tämä vastaa karkeasti arvioiden jopa yli 4 vuoden käyttöiän lisäystä.

4.1.5.2 Kierrosnopeuden vaikutus laakerin elinikään

Yksi elementti, jolla käyttäjä voi parantaa laakerin käyttöikää on sen pyörimisnopeutta alentamalla. Tämä ei kuitenkaan aina ole varteenotettava vaihtoehto, koska tässäkin esimerkkitapauksessa laitteelta vaaditaan jotain tiettyä kierrosnopeutta, eikä sitä näin ollen ole mahdollista muuttaa. Alla olevassa kuvassa (Kuva 40) on listattu kuinka paljon kierrosnopeus vaikuttaa laakerin käyttöikään, kun oletetaan, että muut tekijät pysyvät vakioina.

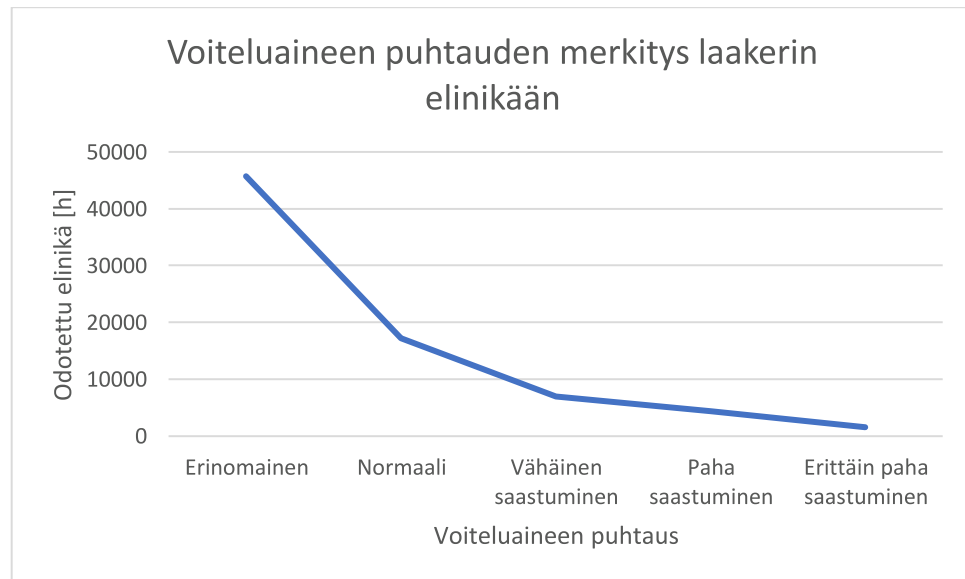


Kuva 40. Kierrosnopeuden vaikutus laakerin käyttöikään

Yllä olevasta kuvasta (Kuva 40) havaitaan, että kierrosnopeuden muutoksella ei ole dramaattista vaikutusta laakerin käyttöikään. Tästä syystä siihen keskittyminen ei ole olennaista. Lisäksi käyttäjän on todellisessa tilanteessa hyvin hankala vaikuttaa laitteen pyörintänopeuteen, ainakin tässä kyseisessä tapauksessa. Ajateltaessa esimerkiksi pumppu- tai puhallinkäyttöä voitaisiin optimoimalla kierrosnopeus saavuttaa jonkinasteinen hyöty laakerin eliniässä.

4.1.5.3 Voiteluaineen puhtauden merkitys laakerin käyttöikään

Toimintalämpötilan ohella yksi tärkeimmistä ja helpoiten vaikutettavissa olevista tekijöistä laakerin eliniälle on voiteluaineen puhtaus. Suoritettaessa laakerin rasvaus on syytä olla varma siitä, että rasva on oikeanlaista, siinä ei ole epäpuhtauksia, sitä laitetaan oikea määrä ja rasvaus suoritetaan ajallaan.



Kuva 41. Voiteluaineen puhtauden merkitys laakerin elinikään

Yllä olevasta kuvasta (Kuva 41) voidaan havaita, että voiteluaineen puhtaudella on suuri merkitys laakerin elinikään. Voiteluaineen käsittelyyn ja varastointiin on syytä siis kiinnittää todellista huomiota. Teoriassa jos voiteluaine olisi erittäin puhdasta, voisi laakerin elinikä jopa tuplaantua verrattuna odotettuun elinikään. Toisaalta voiteluaineen sisältäessä vähäisen määrän epäpuhtauksia se puolittaa laakerin eliniän.

4.2 Hydraulikkajärjestelmän viat

Diplomityön aiheena olevassa laitteistossa tärkeässä osiossa on hydrauliset toimilaitteet. Lähes koko toiminta perustuu hydraulikkaneesteiden avulla siirrettävään voimaan ja siitä suoritettaviin mittauksiin. Tämän vuoksi on äärimmäisen tärkeää selvittää, millä tavalla vikatilanteita ja millaisissa olosuhteissa näitä voi syntyä, kun suoritetaan ennakoivaa kunnossapitoa.

Hydraulikkajärjestelmän herkeävinä indikaattoreina vikaantumisen sille pidetään hydraulikkajärjestelmän öljyä. Eri lähteiden mukaan jopa noin 80% järjestelmän häiriötoiminnoista juontaa juurensa käytettävän nesteen epäpuhtauksista [20, s. 2]. Tämä on ymmärrettävissä, kun tarkastellaan niitä kaikkia tehtäviä, joita nesteellä on hydraulikkajärjestelmässä. Näitä tehtäviä ovat muun muassa [21, s. 10-11]:

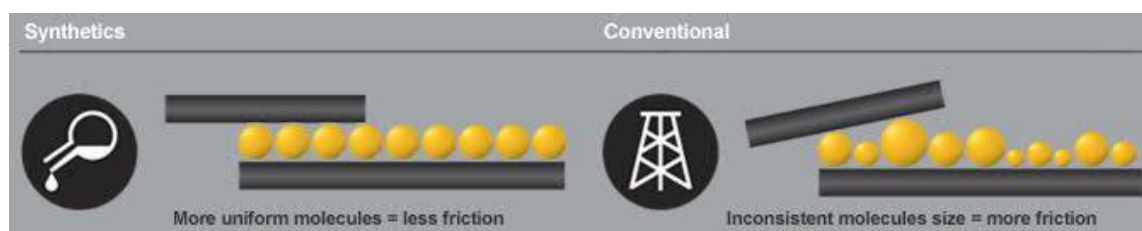
- Energian siirtäminen
- Kitkan ja kulumisen vähentäminen
- Lämmön siirtäminen
- Epäpuhtauksien siirtäminen

Lisäksi nesteelle itselleen on asetettu useita vaatimuksia, jotka sen täytyy täyttää, jotta se suoriutuu oikein ja järjestelmä toimii halutulla tavalla. Tällaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi [21, s. 10-11]:

- Kestävyys hapettumista ja epäpuhtauksien muodostusta vastaan
- Voitelevuus ja voitelukalvon kestävyys järjestelmän kaikissa tilanteissa
- Vedenerottumisominaisuudet
- Korroosionesto-ominaisuudet
- Ilman erottuminen
- Vaahtoamattomuus
- Riittävät leikkaumattomuusominaisuudet
- Suodatettavuus
- Tiivisteiden kanssa yhteensopivuus
- Käyttöturvallisuuteen liittyvät ominaisuudet
- Ympäristöominaisuudet

Kaikkien nesteelle haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi, on sitä jalostettava paljon sekä lisättävä tarvittavia lisäaineita. Lisäaineiden avulla voidaan saavuttaa erilaisia ominaisuuksia nesteelle, kuten haluttuja viskositeettiominaisuuksia tietyllä lämpötila-alueella.

Jalostetut ja jalostamattomat nesteet jaetaan öljyissä synteettisiin ja mineraalisiin öljyihin. Synteettiset öljyt ovat pidemmälle jatkojalostettuja maaöljystä. Lisäksi synteettisten ja mineraaliöljyjen jalostustekniikat ovat erilaisia. Tämän myötä synteettisten öljyjen suorituskky ja kestävyys ovat yleensä parempia kuin mineraaliöljyjen. Tällöin on mahdollista saavuttaa parempi voitelukyky sekä paremmat pumpattavuusominaisuudet myös kylmissä lämpötiloissa (SAE viskositeettiluokitus pienenee) [22].



Kuva 42. Synteettisen ja mineraaliöljyjen molekyylikokojen ero [22]

Kuva 42 vertailee synteettisten ja mineraaliöljyjen ominaisuuksia molekyylikokojen osalta. Kuvasta on nähtävissä, että synteettisen öljyn molekyylien koko on yhtenevä. Tästä voidaan tehdä päätelmä, että synteettiset öljyt ovat pääsääntöisesti parempia öljyjä voitelukykynsä puolesta.

Hydrauliikkajärjestelmät koostuvat nesteen lisäksi yleensä myös säiliöstä, pumpusta, letkuista, putkista, sylintereistä, suodattimista, jäähdyttimistä, moottorista, antureista/

mittareista sekä erilaisista venttiileistä. Diplomityön aiheena olevasta laitteistosta löytyy kaikkia näitä edellämainittuja, lukuunottamatta hydraulikkamoottoreita ja sylintereitä. Näin ollen mahdollisia vikaantuvia komponentteja on paljon, joten kunnossapidon kannalta on järkevää valita vain tärkeimmät ja herkimmin vikaantuvat komponentit seurantaan.

Seuraavissa alakappaleissa on käyty läpi hydraulikkajärjestelmän ominaisuuksia, mahdollisia vikatapauksia, sekä sen vaikuttavuutta järjestelmän toimintaan. Lisäksi niiden seurattavuutta ja mahdollisia menetelmiä ennakkoivaan kunnossapitoon on nostettu esille.

4.2.1 Hydraulikkaneeste ja sen luokittelu

Teollisuudessa käytettävien hydraulikkaneesteiden pääasiallinen luokittelutapa perustuu eri standardeihin, joissa nesteet luokitellaan viskositeetin perusteella [21, s. 13]. Viskositeetti ilmaisee tietyssä lämpötilassa olevan nesteen ”jäykkyyden”, joka syntyy siinä olevien molekyylien välisestä kitkasta. Viskositeetti kuvaa siis nesteen kykyä vastustaa virtausta. Viskositeetista tiedetään myös, että se on suuresti riippuvainen vallitsevasta lämpötilasta, mutta myös jonkin verran järjestelmän käyttöpaineesta.

Hydraulikkaneesteiden viskositeetti pienenee, kun lämpötila nousee ja viskositeetti suurenee, kun lämpötila pienenee. Tämä täytyy ottaa huomioon suunniteltaessa järjestelmiä niin, että neste on pumpattavissa myös järjestelmän käynnistyksen yhteydessä, kun neste on kylmää ja viskositeetti suuri, mutta myös siinä tapauksessa, kun normaali toimintalämpötila on saavutettu ja viskositeetti on pienentynyt.

Viskositeetin ollessa suuri, järjestelmän kitkahäviöt suurenevät, mutta toisaalta samalla vuotohäviöt pienenevät, jolloin volumetrinen hyötysuhde kasvaa. On kuitenkin olemassa mahdollisuus, jolloin viskositeetti on niin suuri, että neste ei muodosta riittävää voitelukalvoa voideltaviin pintoihin, koska se ei pumpaudu oikealla tavalla öljykanaviin. Voitelukyvyyn pettäminen voi tulla myös kyseeseen, kun viskositeetti on liian pieni. Tällöin voitelukalvo on liian ohut voideltavien kappaleiden välillä ja on mahdollisuus, että voitelu pettää. Niinpä oikean nesteen valinta jo pelkän viskositeetin perusteella on järjestelmäkohtainen [2, s. 203-206].

Teollisuudessa öljyt luokitellaan standardin ISO 3448 mukaan viskositeettiluokkiin, joita on 20 kappaletta välillä $2 \text{ mm}^2/\text{s}$ – $3200 \text{ mm}^2/\text{s}$ (ks. *Liite B: ISO 3448 VG- luokittelu* [21, s. 13]). Standardin luokittelu tehdään nesteen kinemaattisen viskositeetin perusteella, eli siinä ei huomioida nesteen tiheyttä kuten dynaamisessa viskositeetissa. Viskositeetit ovat toisiinsa relaatioissa kaavan 5 mukaan:

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (5)$$

jossa ν = kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]

η = dynaaminen viskositeetti [$Pa \cdot s$]

ρ = tiheys [kg/m^3]

Tarkasteltava järjestelmä antaa suuren haasteen viskositeetin osalta, koska siinä käytettävän nesteen kinemaattinen viskositeetti on vain hieman yli $1 \text{ mm}^2/s$ lämpötilassa 25°C . Niinpä se ei mahdu edes ISO 3448 standardin luokittelujoukkoon. Tämä luo suuria ongelmia tarkasteltaessa tarvittavia voitelukalvoja hydraulikkajärjestelmässä. Lisäksi vuotovirrat kasvavat suureksi, jolloin volumetrinen hyötysuhde jää pieneksi. On myös syytä huomioida alhainen lämpötila, jossa viskositeetti on annettu. Tämä aiheuttaa sen, että lämpötilavaihtelu järjestelmässä on pidettävä hyvin alhaisena, jotta viskositeetti ei muutu liiaksi. Viskositeetin on pysyttävä stabiilina myös mittausteknisistä syistä johtuen, sillä eri viskositeetti nesteellä saattaa vääristää laitteiston toimintaa [16].

Viskositeetin ohella myös nesteen puhtaus on erittäin tärkeä tekijä järjestelmän toiminnan kannalta. Lähes jokaisessa hydraulikkajärjestelmässä on asennettuna jonkinlainen suodatusjärjestelmä. Suodatusmenetelmiä on useita erilaisia, Taulukko 5 erottelee erilaiset suodatusmenetelmät, sekä tarkentaa niiden puhdistusmekanismeja.

Taulukko 5. Erilaisten suodatusmenetelmien kuvaus [20, s. 12]

MENETELMÄ	PUHDISTUSMEKANISMI
PINTASUODATIN	Vähentää kiinteitä hiukkasia järjestelmässä
SYVÄSUODATIN	Vähentää kiinteitä hiukkasia sekä myös vettä ja hartsia
SÄHKÖSTAATTINEN SUODATIN	Vähentää polaarisia epäpuhtauksia
KESKIPAKO SEPARAATTORI	Vähentää öljyä tiheämpiä hiukkasia
TYHJIÖSUODATIN	Vähentää ilma- ja vesipitoisuutta

Yleisimmin teollisuudessa on käytössä pinta- ja syväsuodattimia, koska niiden puhdistusteho on hyvä ja ne ovat taloudellisia.

Suodattimen ja suodatuksen hyvyttä kuvataan suodatusasteella sekä β_x -arvolla. Absoluuttinen suodatusaste kertoo kuinka suuria hiukkasia se suodattaa. Arvo ilmaisee suurimman pallomaisen hiukkasen koon, minkä on mahdollista läpäistä suodatinelementti. Suodatusasteet vaihtelevat sovelluksesta riippuen, mutta esimerkiksi syväsuodattimien suodatusasteen tulisi olla $3\mu\text{m}$ [20]. Tarkasteltavassa laitteistossa on

annettu hydraulikkaneesteelle suodatusasteeksi 6 μ m. Tämä on saavutettu usealla eri suodattimella laitteiston useassa pisteessä.

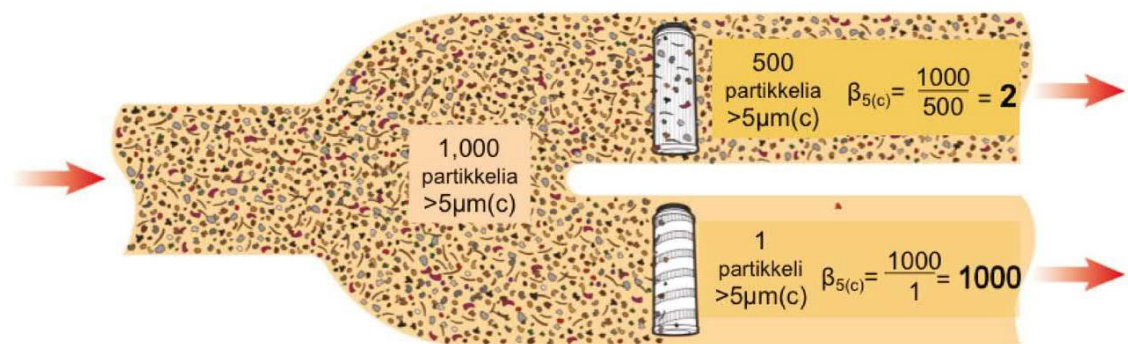
β_x -arvo kuvastaa suodattimen tehokkuutta ja se lasketaan kaavalla 6

$$\beta_x = \frac{\text{Sisään virtaavien koon } x \text{ ja sitä suurempien partikkeleiden lkm}}{\text{Ulos virtaavien koon } x \text{ ja sitä suurempien partikkeleiden lkm}} \quad (6)$$

jossa β = suodatusaste

x = partikkelin koko [μ m]

β_x -arvon laskeminen perustuu Multipass-testiin, joka perustuu standardiin ISO 16889:1999 [23]. Testissä ajetaan suodattimen läpi 1000 kappaletta koon x hiukkasta ja ulostulevasta nesteestä lasketaan suodattimen läpi tulleet hiukkaset. Tulos on riippuvainen siis suodattimen läpi kulkeneiden hiukkasten määrästä, että myös hiukkasten koosta. On siis syytä huomioida, kun arvioidaan eri suodattimien tulosta testissä, millä mikroniarvolla beta-luku on ilmoitettu. Alla olevassa kuvassa (Kuva 43) on selvennetty kahden erilaisen suodattimen arvoja.



Kuva 43. Eri beta-arvojen vertaaminen suodattimissa [23]

Tilanteesta voidaan tulkita, että ylempi suodatin suodattaa 1000:sta 5 μ m kokoisesta hiukkasesta 500 hiukkasta, kun taas alempi suodatin suodattaa 999. Mikäli testi olisi ajettu ylemmällä suodattimella suuremmalla hiukkaskoolla, olisi senkin beta-arvo saattanut olla 1000. Tästä syystä suodattimia vertailtaessa on tärkeää tarkastaa millä hiukkaskoolla testi on suoritettu [23].

Laitteistossa olevien suodattimien beta-arvo vaatimukset ovat todella suuret. Esimerkiksi järjestelmän kahden pääsuodattimien beta-arvot ovat $\beta_5[c]=1000$ ja toisen $\beta_{10}[c]=1000$. Tällöin järjestelmästä voidaan olettaa suodattuvan lähes kaikki yli 5 μ m kokoiset hiukkaset [16]. Seuraava Taulukko 6 antaa konkreettisemmän käsityksen siitä, minkä kokoluokan hiukkasista on kyse:

Taulukko 6. Erilaisten partikkeleiden kokoja [24, s. 221]

Esimerkki	Koko [μm]
Partikkelit tupakan savussa	1
Veren punasolu	8
Pienin ihmissilmän havaitsema partikkeli	40
Ihmisen hius	70
Suolakide	100

Yllä olevasta taulukosta (Taulukko 6) voidaan havaita, että jopa veren punasolut suodattuisivat tarkasteltavassa järjestelmässä kokonaan. Suodatusasteen on oltava tällä tasolla, koska testattavat komponentit vaativat äärimmäistä puhtautta nesteeltä, sillä testilaitteistossa on paljon kanavistoja, jotka voisivat tukkeutua, mikäli sinne pääsee partikkeleita.

4.2.2 Hydrauliikanesteen ongelmat laitteistossa

Suurin ongelma, joka nousee esiin tarkasteltavassa laitteistossa hydrauliikanesteen suhteen, on nesteen todella alhainen viskositeetti. Pienen viskositeetin aiheuttamia ongelmia on osittain kuvattu kappaleessa 4.2.1. Nestettä ei voida vaihtaa toisenlaiseen, eikä sitä saa lisää aineistoa, koska sen on täytettävä valmistajan antamat toleranssit, jotta sillä voidaan luotettavasti suorittaa kalibrointia tarkasteltaviin laitteisiin. Tämän vuoksi viskositeetin aiheuttamia ongelmia ei voida poistaa sen alkulähteiltä.

Pieni viskositeetti aiheuttaa kulumista hydrauliikkajärjestelmän komponenteissa, koska neste ei muodosta riittävää voitelukalvoa. Tyypillisimpiä raja-arvoja viskositeetille on annettu alla olevassa taulukossa (Taulukko 7).

Taulukko 7. Tyypillisimpiä viskositeetin raja-arvoja [25, s. 14]

	Korkein käynnistysviskositeetti [mm^2/s]	Minimi viskositeetti käyttölämpötilassa [mm^2/s]
Mäntäpumppu	500-1000	10-15
Siipi- ja lamellipumppu	500-1000	10-20
Hammaspyöräpumppu	800-1600	10-20

Koska tarkasteltavassa laitteistossa esiintyy sekä hammaspyörä- että ruuvipumppuja voidaan havaita käytettävän nesteen viskositeetin olevan aivan liian alhainen, jotta

tarvittava voitelukyky saavutettaisiin. Yllä olevasta taulukosta voidaan lukea, että pienin valmistajan suosittelema viskositeetti olisi noin $10 \text{ mm}^2/\text{s}$, joka on noin 10 kertaa suurempi kuin käytettävän nesteen. Lisäksi näin alhaisen viskositeetin käyttöä suositellaan käytettäväksi vain tilapäisesti sekä lyhytkestoisesti [25, s. 14].

Viskositeetti-indeksillä ei ole suurta merkitystä tässä laitteistossa, sillä sen käyttölämpötilat pyritään pitämään $10^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}$ välillä, tällöin suuria muutoksia viskositeetissa ei tapahdu.

Hydrauliikkanesteen ollessa näin pieni viskositeettista myös järjestelmän vuodot ilmeentyvät herkemmin. Tämä aiheuttaa ongelmia tiivistyksen ja liitosten kanssa. Yleisimpiä ongelmia, joita vuodot aiheuttavat hydrauliikkajärjestelmässä ovat [24, s. 230]:

- Käyttökulut kasvavat
- Turvallisuusongelmat lisääntyvät
- Ympäristöongelmat lisääntyvät

Varsinkin koneen käyttökulut monesti kiinnostavat yrityksiä, joten öljyvuotojen seurantaan on syytä kiinnittää huomiota.

4.2.3 Hydraulipumpun ongelmat laitteistossa

Järjestelmän vuodot eivät aina ole huono asia, sillä esimerkiksi pumppujen ja moottorien voitelu tapahtuu sisäisten vuotojen avulla. Nämä vuodot ohjataan erillistä vuotolinjaa pitkin takaisin tankkiin, sen nestepinnan alapuolelle. Mikäli vuotolinja sijaitsee tankin nestepinnan yläpuolella, on vaarana seuraavan käynnistyksen yhteydessä, että komponentti ei saa voitelua käynnistyksessä [24, s. 234].

Vuotojen avulla voidaan myös mitata pumpun kuntoa. Kun pumppu alkaa mekaanisesti kulumaan, sen sisäiset välykset kasvavat, jolloin se alkaa vuotamaan enemmän vuotolinjaa pitkin kohti tankkia. Tällöin myös sen volumetrinen hyötysuhde laskee. Pumpun volumetrinen hyötysuhde voidaan määrittää seuraavan kaavan 7 avulla [26]:

$$\eta_{vol} = \frac{Q_{todellinen\ tuotto}}{Q_{teoreettinen\ tuotto}} \quad (7)$$

jossa η_{vol} = volumetrinen hyötysuhde

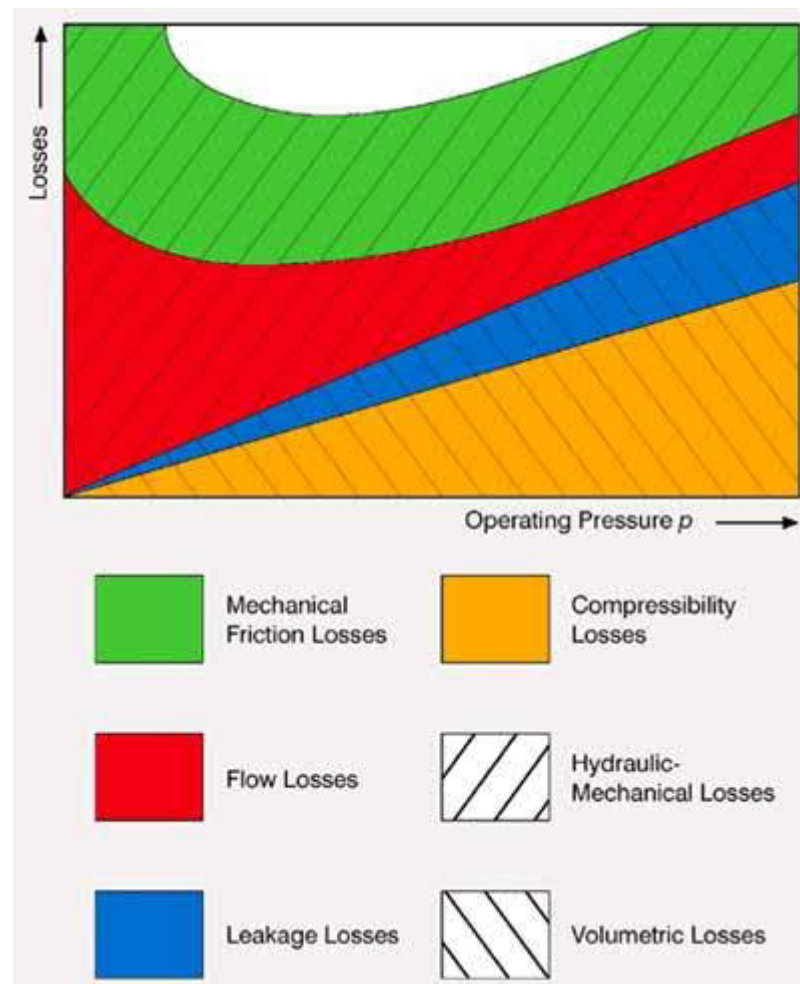
$Q_{todellinen\ tuotto}$ = pumpun tuottama todellinen tilavuusvirtaus [L/min]

$Q_{teoreettinen\ tuotto}$ = pumpun laskennallinen tilavuusvirtaus [L/min]

Mitattaessa vuotolinjasta tilavuusvirtaa on syytä ottaa huomioon, että tulos on hyvin riippuvainen järjestelmäpaineesta ja viskositeetista. Lisäksi järjestelmää testattaessa on

se testattava aina samoilla parametreilla, esimerkiksi täydellä kierrosnopeudella ja muuttuvatilavuuksisen pumpun yhteydessä aina täydellä tuotolla. Muussa tapauksessa mittaustulokset eivät ole vertailukelpoisia todetun hyötysuhteen osalta [26].

Normaalikäytössä, eli tasainen toimintalämpötila ja sopiva viskositeettiluokitus, pumppujen volumetriset hyötysuhteet ovat yli 90% luokkaa. Kuva 44 selventää häviöiden muodostumista ja niiden riippuvuutta järjestelmä paineesta.



Kuva 44. Hydrauliiikkapumpulle tyypillisten häviöiden muodostuminen [27]

Yllä olevasta kuvasta (Kuva 44) on nähtävissä, että vuotohäviöt kasvavat suuresti, kun järjestelmäpaine kasvaa, tästä syystä tehtäessä mittauksia ja tulosten analysointia, on oltava varmoja siitä, että olosuhteet ovat olleet aina samat. Muutoin saavutetuilla tuloksilla ei ole todellista arvoa, eikä niitä voida käyttää laitteen kunnon arviointiin muuta kuin vähäisessä määrin.

Suurimmat tekijät hydrauliikkapumpun elinkaaren pitämiseksi odotetun mukaisena ovat [19, s. 41-45]:

- Öljyn riittävä puhtaus

- Öljyn sopivuus käyttökohteeseen nähden
- Oikeat käyttötavat
- Kavitaation estäminen oikeanlaisella suunnittelulla
- Riittävä huolto

Oikeat käyttötavat ovat yksi edullisimmista tavoista pitää järjestelmä toimintakuntoisena mahdollisimman pitkään. Esimerkiksi pumpun ylikuormittaminen rasittaa sen laakereita todella suuresti. Ylikuormittamisen tuomaa haittaa pumpulle voidaan arvioida alla olevilla kaavoilla 8 ja 9.

- Paineen noston vaikutus:

$$\text{Odotettu elinikä} = \text{Alkuperäinen ikä} * \left(\frac{\text{Alkuperäinen paine}}{\text{Uusi paine}} \right)^3 \quad (8)$$

- Pyörintänopeuden noston vaikutus:

$$\text{Odotettu elinikä} = \text{Alkuperäinen ikä} * \frac{\text{Alkuperäinen nopeus}}{\text{Uusi nopeus}} \quad (9)$$

Kaavoista huomataan, että paineen nostaminen normaalin käyttörajan ylitse vaikuttaa todella radikaalista pumpun käyttöikään. Sen sijaan pyörintänopeuden vaikutus käyttöikään on lineaarinen [19, s. 44].

Kavitaatiota ilmenee pumpussa, kun pumpattava neste ei täytä täydellisesti koko tilaa pumpussa. Tällöin nesteeseen syntyy ilmakuplia, jotka täyttyvät höyryllä, koska paine laskee niin alhaiseksi, että neste höyrystyy osittain. Höyrykuplien siirtyessä korkeampaan paineeseen pumpun painelinjastoon, ne puristuvat äkillisesti kokoon paineen nousun vaikutuksesta. Tämä äkillinen kokoonpuristuminen kuluttaa pumpun metallipintoja, irroittaen niistä metallipartikkeleita. Kavitaation yhteydessä on tyypillistä, että pumppu pitää asiaan kuulumatonta ääntä ja siitä on havaittavissa värähtelyä.

Kavitaatiota voidaan ennaltaehkäistä oikeanlaisella järjestelmän suunnittelulla, sekä pitämällä huolta, että järjestelmään ei pääse kertymään ylimääräisiä ilmakuplia. Muun muassa putkiston mitoittaminen on osa hyvää suunnittelua kavitaation ennaltaehkäisyssä. Esimerkiksi korvaaminen jokin putkiston osa halkaisijaltaan pienemmällä putkella, aiheuttaa paineenlaskua, joka voi aiheuttaa kavitaatiota [19, s. 44-45].

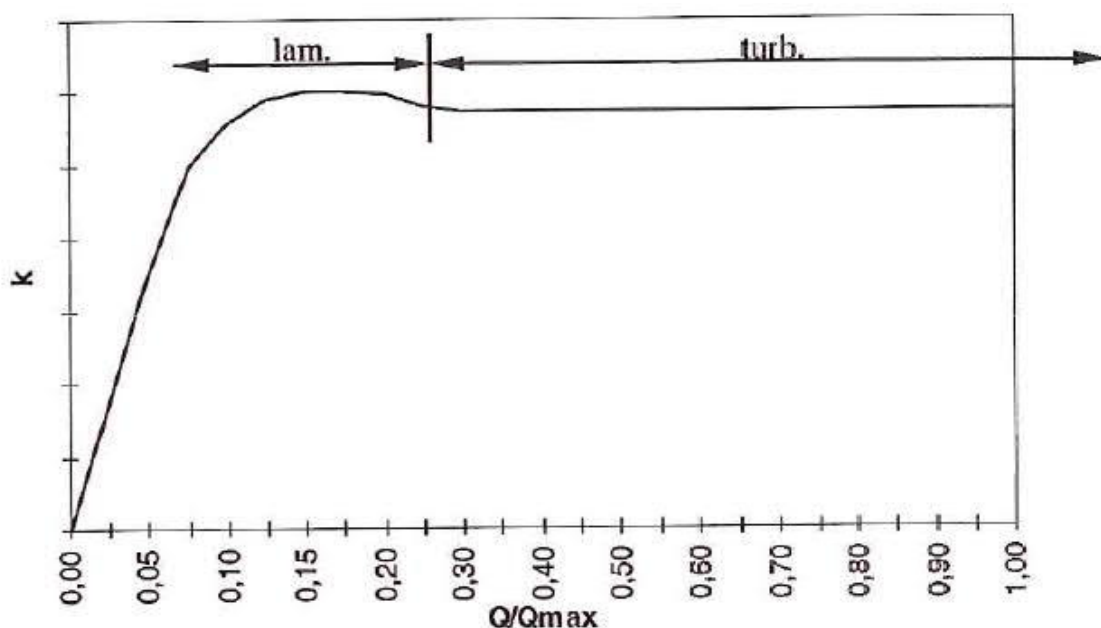
4.2.4 Venttiileiden ja antureiden ongelmat laitteistossa

Tarkasteltavan laitteiston hydrauliiikkajärjestelmä koostuu useasta anturista ja venttiilistä, jotka ohjaavat ja antavat tietoa käyttäjälle eri toimintatilanteista. Suurimmat ongelmat ja häiriön aiheuttajat näille komponenteille löytyy hydrauliiikkanesteestä ja sen puhtaudesta. ISO 4572 antaa minimisuodatussuhteen arvoksi proportionaalijärjestelmille $\beta_6 > 75$ [21, s. 72]. Tämä toteutuu hyvin tällä hetkellä käytettävillä suodattimilla. On syytä kuitenkin

esimerkiksi öljyanalyysia tehtäessä tarkistaa, että riittävä öljynpuhtaus täyttyy myös ISO 4406 (1999) mukaisen taulukon mukaisesti. Siinä annetaan erikokoisille partikkeleille maksimipitoisuudet, jotka proportionaalijärjestelmässä ovat 20/ 15/ 12 [$> 4\mu\text{m}/ > 6\mu\text{m}/ > 14\mu\text{m}$] [21, s. 71].

Vikaantuneen venttiilin voi havaita järjestelmästä esimerkiksi virtauksen säätämisen hankaluutena. Putkistossa kulkeva tilavuusvirtaus voi vaihdella ja se on haastavaa saattaa halutulle tasolle. Venttiilin takertelu voi näkyä myös painevaihteluna tai järjestelmän liiallisena lämpenemisenä. Lisäksi on mahdollista, että todella pitkälle edenneissä vikaantumistilanteissa venttiili pitää ylimääräistä ääntä liikkeessaan [19, s. 63-64].

Antureista herkimpiä vikaantumaan ovat turbiinianturit, mutta oikeissa olosuhteissa niiden voidaan olettaa kestävän jopa 20 000 käyttötuntia. Turbiinianturin rakenne on hyvin yksinkertainen. Se koostuu putkessa pyörivästä turbiinista ja sen pyörintänopeutta mittaavasta anturista. Kun putkessa virtausnopeus kasvaa, pyörii anturi nopeampaa ja tämä havaitaan anturista syntyvien jännitepulssien taajuuden muutoksena. Turbiiniantureilla voidaan mitata hyvinkin suuria virtauspitoisuuksia luotettavasti, mutta on huomioitava, että pienellä virtauksella kun virtaus on laminaarista, anturin tuottama tieto ei ole lineaarinen suhteessa virtausnopeuteen [28, s. 95-96].



Kuva 45. Turbiinianturin tyypillinen käyttäytymiskuvaaja [28, s. 96]

Yllä olevasta kuvasta (Kuva 45) nähdään, että virtauksen ollessa turbulენტista, on turbiinianturin käyttäytyminen lineaarista. Sen sijaan pienillä suhteellisilla virtauksilla anturin arvot täytyy laskea sille ominaisen k-käyrän avulla.

Yleisimmät ongelmat turbiiniantureiden kanssa tulevat, kun sen käsittely on virheellistä. Esimerkiksi sen puhdistaminen paineilmalla ei ole sallittua, eikä anturiin saa edes

puhaltaa. Kun anturiin puhalltaa, nousee sen pyörintänopeus äkillisesti liian suureksi ja vaarana on, että sen laakerit rikkoontuvat. Vikaantuessaan anturi voi pitää ääntä, mutta ensimmäisenä vikaantumisen huomaa virheellisistä mittausravista. Tätä pyritään kontrolloimaan vuosittaisella kalibroinnilla ja näin voidaan olla varmoja, että mittaustulokset ovat päteviä. Mikäli anturi vikaantuu, yleensä ne eivät ole korjattavissa, vaan ne täytyy uusia.

4.3 Pneumaattiset viat

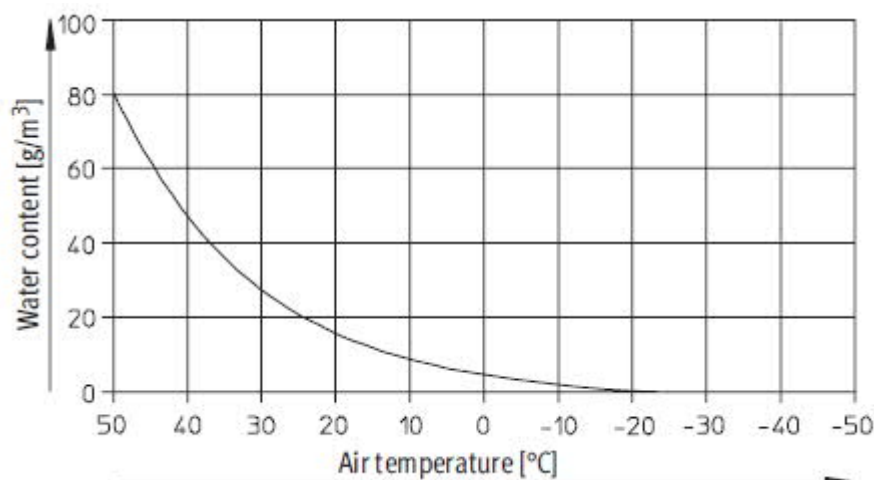
Paineilman käyttö tarkasteltavassa laitteistossa rajoittuu lähinnä hydraulisten venttiilien ohjaukseen sekä vertailupaineen muodostamiseen. Paineilmalle ei ole kovin tiukkoja vaatimuksia esitetty järjestelmän osalta, mutta ISO 8573-1 standardi antaa ohjeellisia tavoitearvoja paineilman laadulle. Tärkeimmät tekijät paineilman laadun mittaamisessa ovat sen partikkelipitoisuus, vesipitoisuus ja öljypitoisuus [29]. Taulukko 8 kuvaa standardin mukaisia laatuluokituksia paineilmalle.

Taulukko 8. Paineilman laatuluokitukset DIN ISO 8573-1

Luokitus	Kiinteät aineet		Vesipitoisuus	Öljypitoisuus
	Max. Partikkelin koko [μm]	Max. Partikkelin tiheys [mg/m^3]	Maksimipaineen kastepiste [$^{\circ}\text{C}$]	Maksimi öljypitoisuus [mg/m^3]
1	0,1	0,1	-70	0,01
2	1	1	-40	0,1
3	5	5	-20	1
4	15	8	3	5
5	40	10	7	25
6	-	-	10	-
7	-	-	-	-

Suositusluokitukset yleiseen teollisuuskäyttöön ovat: partikkelit 5, vesi 4 ja öljy 5 [29]. Tällöin suodatustaso olisi hyvä olla $40\mu\text{m}$ ja paineilman kastepiste 3°C . Tarkasteltava laitteisto ei anna tarkempia vaatimuksia luokituksiin nähden.

Paineilman vesipitoisuus on vahvasti riippuvainen sen lämpötilasta, sillä ilman suhteellinen kosteus muuttuu lämpötilan mukana. Mitä lämpimämpää ilma on, sitä enemmän se kykenee sitomaan kosteutta itseensä. Ongelmia vedenmuodostuksessa paineilmaan syntyy, kun paineilmaa jäähdytetään. Kuva 46 selventää ilmiötä ja sen riippuvuutta lämpötilasta.



Kuva 46. Ilmaan sitoutuneen veden määrän riippuvuus lämpötilasta [29]

Yllä olevan kuvan (Kuva 46) avulla voidaan havaita, että ilman ollessa esimerkiksi 25°C siihen sitoutuneen kosteuden määrä kylläisenä on noin 20 g/m³ ja kun se jäähdytetään 3°C sitoutuneen kosteuden määrä on enää vain 6 g/m³. Kaikki loppu määrä, eli noin 14 g/m³, kondensoituu pisaroiksi. Ilman jäähdyttämisen aiheuttamaa veden kondensoitumista käytetään yleisesti ilman kuivaimen esiasteena. Jäähdyttäminen tapahtuu jälkijäähdytysvaiheessa, jossa on myös vedentyhjennysmekanismi. Myös paineilmasäiliölle voidaan tulkita olevan vastaavanlainen tehtävä ja toimintaperiaate veden kuivaamisena. Varsinainen ilman kuivaaminen tapahtuu yleensä linjastoon sijoitetussa kuivaimessa. Tapoja ilman kuivaamiseen ovat esimerkiksi jäähdytyskuivaus, jossa ilman lämpötila jäähdytetään kastepisteeseen (noin 2°C - 5°C) ja tiivistynyt vesi poistetaan vedenerottimella, sekä toinen yleinen tapa on absorptiokuivaus, jota käytetään yleensä silloin, kun kastepiste on hyvin alhainen, kuten ulkokäytöissä. Absorptiokuivaus perustuu johonkin väliaineeseen, joka pystyy sitomaan kosteutta itseensä, kuten silicageelin käyttöön [30, s. 25-30].

Paineilman kuivaamisen tarkoituksena on vähentää käyttölaitteiden kulumista sekä pitää tehon tuotto tasaisena ja häiriöttömänä. Samalla vähennetään vuotojen mahdollisuutta sekä estetään mahdolliset jäätymistilanteet, joita voi esimerkiksi ulkokäytössä tapahtua.

Öljyä siirtyy paineilmaan kompressoreiden voitelujärjestelmän kautta. Sitä voi esiintyä ilmassa useassa eri muodossa ja joissakin tapauksissa sen ei haluta päätyvän itse toimilaitteille. Tällöin sitä voidaan poistaa paineilmasta veden mukana tai erilaisilla suodattimilla. Suodattimilla poistetaan myös kiinteitä partikkeleita paineilmasta, jotta ne eivät kulkeutuisi toimilaitteille asti ja näin ollen aiheuttaisi kulumista [30, s. 30].

Paineilmajärjestelmää pidetään yleisesti hyvin toimintavarmana. Varsinkin tarkasteltavassa laitteistossa paineilman osuus järjestelmässä on melko vähäinen. Sen pääasiallisena tehtävänä on ohjata hydrauliikkaventtiileitä. Yleisimmät vikatilanteet, joita kohdataan paineilman kanssa ovat vuodot. Nämä on kuitenkin melko helppo paikallistaa,

koska vuotokohdasta kuuluu ääni. Mikäli vuoto on pieni, se ei välttämättä vaikuta koneen käyttöön lainkaan, eikä se aiheuta ongelmia ympäristöönsä.

Suuremmat ongelmat paineilmajärjestelmässä aiheutuvat kompressorin toimintaa liittyvissä häiriötilanteissa. Esimerkiksi puutteellinen voitelu tai suuremmat vuodot, voivat aiheuttaa sen, että kompressorin toimii normaalia toimintalämpötilaa korkeammalla lämpötila-alueella, eikä sille jää aikaa tarvittavalle jäähtymiselle. Pitkäaikainen ylikuormittaminen ja toimiminen liian suurilla lämpötiloilla johtaa ennen pitkään laakereiden pettämiseen tai jonkin muun yksittäisen komponentin hajoamiseen kompressorissa [31, s. 172].

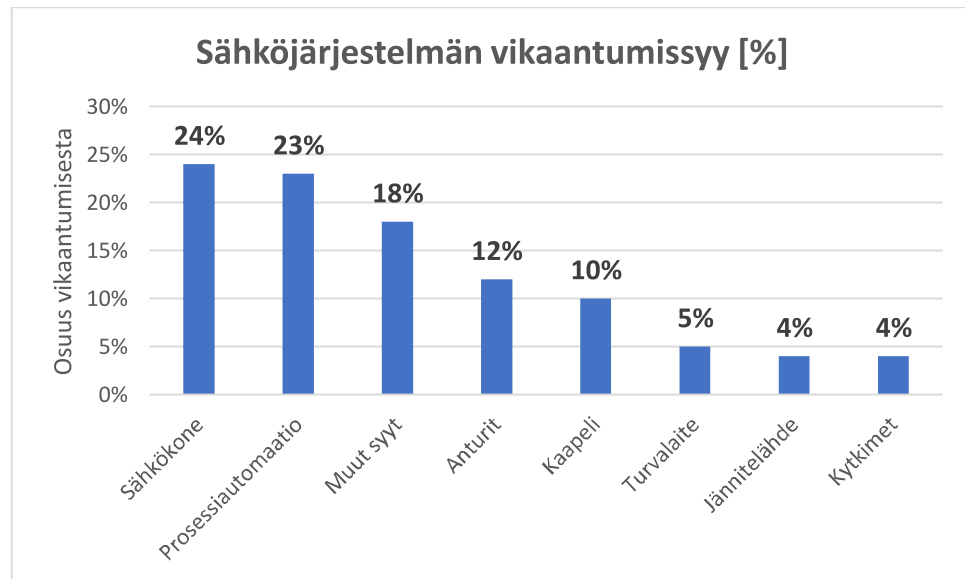
4.4 Sähköiset ja ohjelmalliset viat

Tyypillisimpiä ongelmia, joita sähkö- ja elektroniikkakomponenteissa esiintyy johtuvat sähkön ominaisuuksista. Tällaisia ongelmia ovat muun muassa:

- Oikosulut
- Eristysviat
- Katkokset
- Ylikuormitukset
- Huono kosketus/ johtavuus
- Kytkevirheet

Kukin näistä ongelmista ilmenee omalla tavallaan järjestelmässä. On tärkeää, että ongelman juurisyy löytyy ja vian korjaaminen tapahtuu oikealla tavalla [4, s. 89]. Joissakin tapauksissa ongelman määrittäminen voi olla hyvin hankalaa, sillä vikatilanteet saattavat ilmentyä toisistaan riippumattomissa tilanteissa, esimerkiksi katkokset, joten vian paikallistaminen ja korjaaminen vie aikaa. Lisäksi tietokoneohjatuissa järjestelmissä on pystyttävä tunnistamaan, johtuuko vika sähkökomponentista vai onko häiriö ohjelmasta johtuva. Ohjelmistovikoihin vaikuttaminen on hyvin hankalaa, sillä ne ovat pääosin suunnittelusta johtuvia [4, s. 60].

Tyypillisimmät syyt sähköjärjestelmän vikaantumiselle voivat jakaantua esimerkiksi seuraavan kuvan (Kuva 47) mukaisesti. Kuvan aineistona on todellinen paperitehdas [14, s. 16]



Kuva 47. Paperitehtaan sähköjärjestelmän vikaantumiskohteita [14, s. 16]

Kuvasta (Kuva 47) voidaan nähdä, että sähkökoneet ovat yksi suurimmista syistä tuotannossa esiintyvistä seisakeista. Niiden osuuden ollessa miltei neljännessä kaikista tuotannon pysäyttämiseen johtaneista sähköjärjestelmän vikatiloista.

Tärkeimmät komponentit/ elementit teollisten sähköjärjestelmien piirissä ovat yleensä:

- Tietokone/ ohjelmisto
- Sähkökoneet (moottorit/ generaattorit)
- Taajuusmuuttajat
- Anturit
- Kytkimet
- Syöttöverkko/ jännitelähteet
- Elektroniikan passiivi-, aktiivi- ja puolijohdekomponentit

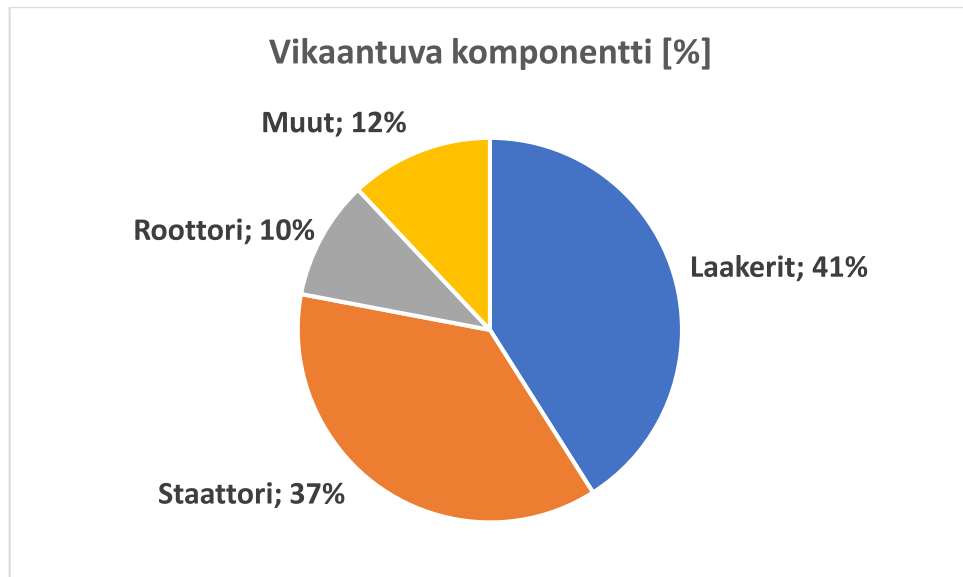
Tarkasteltavasta laitteesta löytyy näitä kaikkia elementtejä. Se koostuu taajuusmuuttajaohjatuista oikosulkumoottoreista, joiden toimintatiloista saadaan tieto eri antureiden avulla tietokoneelle, jolla voidaan myös välittää haluttuja referenssejä taajuusmuuttajalle. Ohjausjärjestelmä on tyypillinen teollisuudessa esiintyvä takaisinkytketty ohjaus (Closed-loop Control).

Seuraavissa alakappaleissa on käyty läpi eri komponenteissa esiintyviä mahdollisia vikatilanteita, niiden aiheuttajia, mahdollisia estokeinoja sekä merkitystä järjestelmän toiminnan kannalta.

4.4.1 Oikosulkumoottorit

Oikosulkumoottorit koostuvat karkeasti luokiteltuna neljästä eri osiosta: roottorista, staattorista, rungosta ja laakereista. Oikosulkumoottorin toimintaperiaatetta ei lähdetä tämän työn puitteissa tarkemmin käsittelemään muilta osin kuin se on oleellista kunnossapitoa ajatellen.

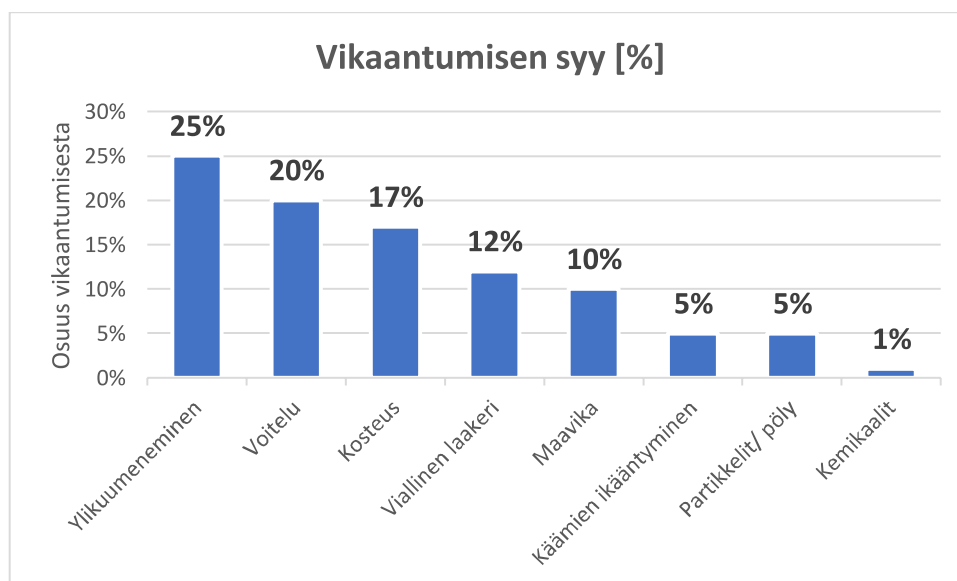
Oikosulkumoottoreiden vikojen jakaantuminen moottorin osioiden välillä voidaan tehdä karkeasti alla olevan kuvan (Kuva 48) avulla



Kuva 48. Oikosulkumoottorin vikojen jakaantuminen osioittain [14, s. 25]

Suurin syy moottorin vikaantumiselle löytyy sen laakereista. Laakereiden vikaantumisyytä on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.1.3. Lähes yhtä suurella osuudella vikaantumistapauksissa ovat staattorissa esiintyvät viat, nämä voidaan paikallistaa joko staattorin runkoon tai staattorikäänityksen vikoihin. Käänityksissä esiintyviä vikoja ovat muun muassa eristeviat, ikääntyminen, lämpövauriot ja fyysiset vauriot [14, s. 26].

Vikaantumiseen johtaneiden syiden osuus voidaan jakaa kuten Kuva 49 osoittaa:



Kuva 49. Oikosulkumoottorin vikaantumiseen johtaneet syyt [14, s. 25]

Kuvasta voidaan tulkita, että suurin syy oikosulkumoottorin vikaantumiselle on sen ylikuumentuminen. Ylikuumentuminen voi johtua useasta syystä, kuten ylikuormittamisesta tai puutteellisesta jäähdytyksestä. Laakereihin ja niiden voiteluun liittyvät syyt ovat myös yksi suurimmista vikatilanteita aiheuttavista tekijöistä. Tämän vuoksi yksi tärkein ennaltaehkäisevä keino sähkömoottorin toiminnan katkeamiseksi, on pitää huoli, että sen laakerit ovat oikein rasvattu/ voideltu ja jäähdytys toimii oikein.

Tyypillisimpiä tapoja oikosulkumoottorin kunnonvalvontaan on useita, sillä oikosulkumoottorin ollessa sähkömekaaninen laite, siinä on useita indikaattoreita, joita seuraamalla voidaan havaita muutoksia toimintakunnossa. Tärkeintä on tarkastella juurikin toiminnoissa tapahtuvia muutostiloja, sillä ne antavat usein varminnan signaalin siitä, että kulumista on tapahtunut.

Muun muassa seuraavilla tavoilla voidaan mitata oikosulkumoottorin toimintaa ja käyttää mittaustietoa kunnon analysointiin: [12][13][32][33]:

- Lämpötilamittaukset
- Magneettivuomittaukset
- Värähtelymittaukset
- Äänimittaukset
- Staattorivirta-/ -jännitemittaukset
- Osittaispurkausmittaukset
- Akseli-/ laakerijännite ja -virtamittaukset
- Liitinjännitemittaukset

Oikosulkumoottorin valvontaan on olemassa siis useita eri mittaustapoja. Näistä jokaisella voidaan mitata eri parametreja ja havaita erilaisia vikaantumistapahtumia, joten

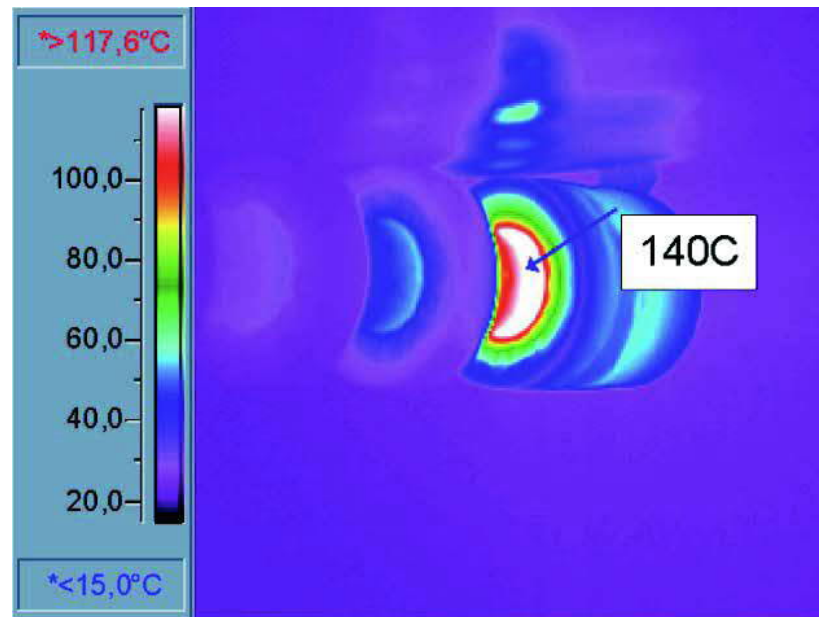
oikean mittausmenetelmän valinta on suoritettava huolella. Mittausmenetelmät ovat standardisoituja PSK 77 sarjan mukaisesti ja niille on annettu viitteellisiä ohjeita, millaisiin tilanteisiin mikäkin menetelmä on soveltuva [13, s. 21]. Alla on käyty hieman tarkemmin läpi mittausmenetelmiä ja niiden soveltuvuutta eri vikatilanteiden havaitsemiseen.

4.4.1.1 Oikosulkumoottorin lämpötilamittaukset

Oikosulkumoottorin lämpötilaseurantaa voidaan suorittaa joko lämpökamerakuvauksilla tai pintaan kiinnitettävillä lämpötila-antureilla. Tällä hetkellä suosiota on kasvattanut lämpökamerakuvauksilla tehtävät mittaukset, sillä se on kohtuullisen nopea ja vaivaton tapa tarkkailla lämpötilaa. Verrattuna pistemäiseen anturimittaukseen lämpökameralla saadaan laajempi skaala eri toimintalämpötiloista ympäristössä, mutta lämpökameramittausten oikeanlainen tulkinta ja oikea aikatauluttaminen tuovat haasteensa. Tarkempi kuvaus lämpökameran toiminnasta löytyy kappaleesta 5.6.

Lämpötilamittauksilla voidaan havaita oikosulkumoottorista esimerkiksi laakerivikoja sekä käämien ja liitännöiden häiriöitä. On syytä muistaa kuitenkin, että tarkasteltaessa käämi- ja liitännävikoja, saadakse luotettavia johtopäätöksiä kunnontilasta, tulisi lämpötilamittauksia verrata aikaisempiin mittaustuloksiin. Sen sijaan laakerivikoja tarkasteltaessa, vallitsevasta lämpötilasta voidaan tehdä melko johdonmukaisia päätelmiä laakerin kunnosta, vaikka aikaisempia mittauksia ei olisikaan [13, s. 71].

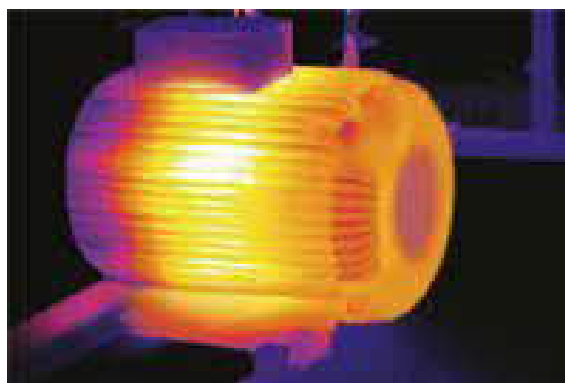
Lämpökameralla tehtävässä kuvauksessa kuvataan sähkömoottorin runkoa ulkoapäin ja tarkastellaan mahdollisia lämpötilapoikkeamia. Esimerkiksi alla olevassa kuvassa (Kuva 50) oikosulkumoottorin D-pään laakeri on jo vaarallisen lämmin.



Kuva 50. Oikosulkumoottorin D-pään laakerin lämpökamerakuvaus [34]

Suoritettaessa moottorin ulkopuolisia lämpötilamittauksia, on hyvä tiedostaa, että laakerin sisäkehän lämpötila on yleensä noin 10 °C lämpimämpi kuin vastaava ulkokehän lämpötila. Niinpä esimerkiksi tavoiteltaessa 80 °C lämpötilaa, on normaalia, että lämpökuvauksessa näkyvä lämpötila on noin 70 °C luokkaa, eikä 80 °C [34].

Oikosulkumoottorin käämitysongelmia ja niiden lämpötiloja on pyritty mittaamaan myös kiinteästi asennetuilla lämpötila-antureilla. Esimerkiksi valmistusvaiheessa voidaan suoraan staattorin käämiuriin sijoittaa Pt-100 antureita, joiden avulla saadaan tarkka lämpötila joka toimintatilanteessa. Myös lämpökamerakuvauksella voidaan saada viitteitä mahdollisista käämiongelmista.



Kuva 51. Lämpökamerakuva sähkömoottorin viallisista käämeistä [35, s. 18]

Kuva 51 esittää ulkopuolisen lämpökamerakuvan oikosulkumoottorista, jonka käämeissä on vika. Vikatila näkyy kohonneena sisäisenä lämpötilana.

4.4.1.2 Oikosulkumoottorin magneettivuomittaukset

Magneettivuomittaukset perustuvat sähkökonekäytössä mittauksiin sähköisestä ilmiöstä, jonka avulla momenttia siirretään roottorin ja staattorin välillä ilmvälissä. Mikäli kone olisi täysin ideaalinen, sen magneettivuo vaihtelisi sinimuotoisesti ajan ja paikan suhteen. Staattori- ja roottorikäämitysten viat sekä syöttöjännitteen häiriöt aiheuttavat kuitenkin muutoksia sähkökoneen magneettivuohon [13].

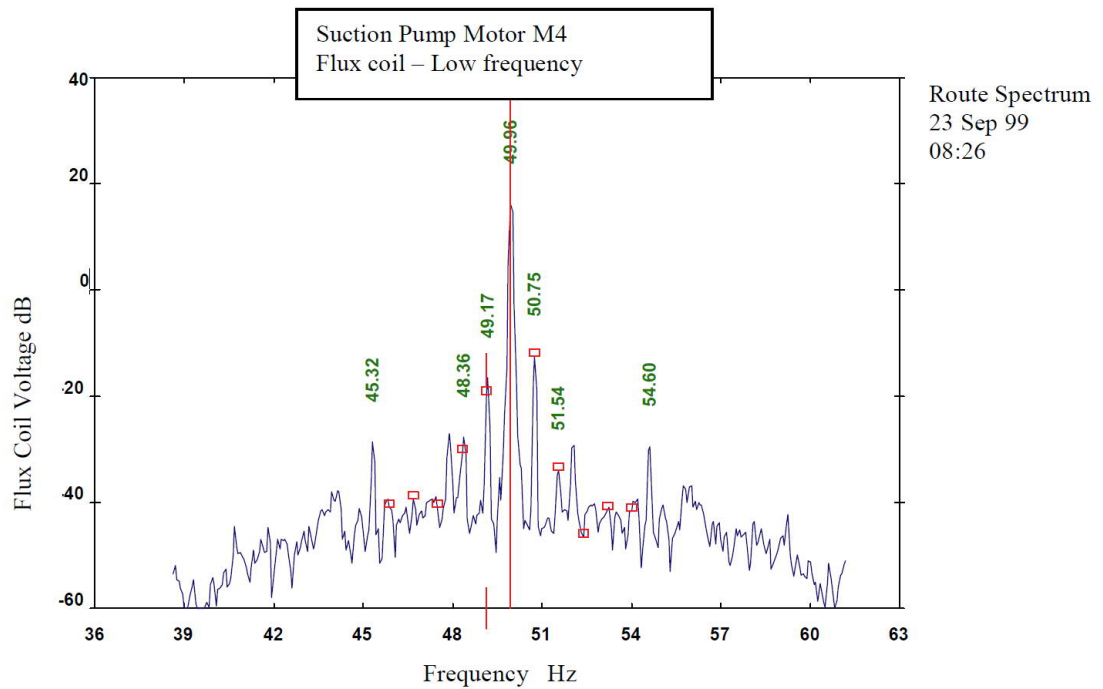
Suoritettaessa magneettivuomittauksia oikosulkumoottorille, tarkoituksena on tarkastella aksiaalivuossa tapahtuvia muutoksia ja epälineaarisuuksia. Mittaustuloksia tulkittaessa on kuitenkin tärkeää, että on olemassa referenssimittaus ehjästä koneesta, sillä aksiaalivuon epälineaarisuutta on aina havaittavissa koneessa, sillä staattorissa ja roottorissa on aina pieniä epäsymmetrisyyksiä [36, s. 19-20].

Mittaaminen tapahtuu mittalaitteesta riippuen yleensä moottorin N-päädystä, joko akselin ympärillä olevalla mittakäämillä tai Hall-anturilla. Anturin vakaa kiinnitys ja mittausten samankaltaisuus tuovat vertailukelpoisia tuloksia. Kuva 52 on esimerkki asetelmasta, jolla aksiaalivuomittaus voidaan suorittaa.

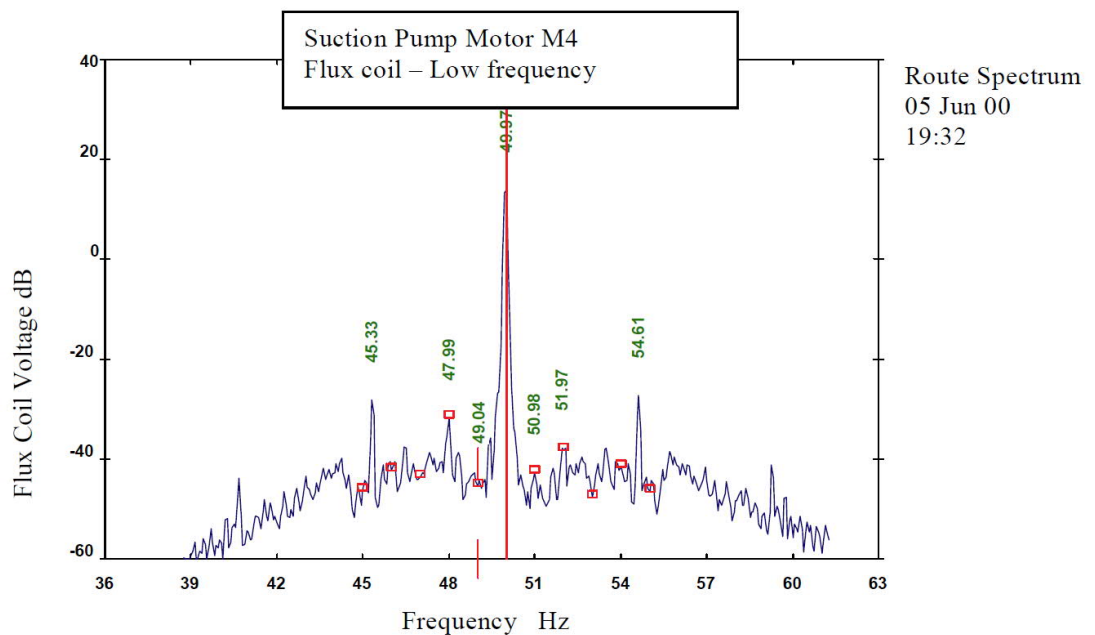


Kuva 52. Sähkömoottorille tehtävä aksiaalivuomittauksen asetelma [36, s. 21]

Saaduista mittaustuloksista tehdään spektrianalyysi FFT (Fast Fourier Transform) muunnoksella, sillä voidaan tarkastella vuon amplitudia eri taajuuksilla. Eri vikatilanteet näkyvät hieman eri tavalla saadussa spektrissä, lisäksi spektrit ovat erilaisia, kun moottoria ohjataan taajuusmuuttajalla. Kuva 53 ja Kuva 54 ovat vertailun vuoksi havainnollistamassa, millä tavoin aksiaalivuossa näkyy erilaisia oikosulkumoottorin vikoja.



Kuva 53. Viallisia roottorisauvoja sisältävän oikosulkumoottorin aksiaalivuosespektri [36, s. 89]



Kuva 54. Taajuusmuuttajaohjatun ehjän oikosulkumoottorin aksiaalivuosespektri [36, s. 70]

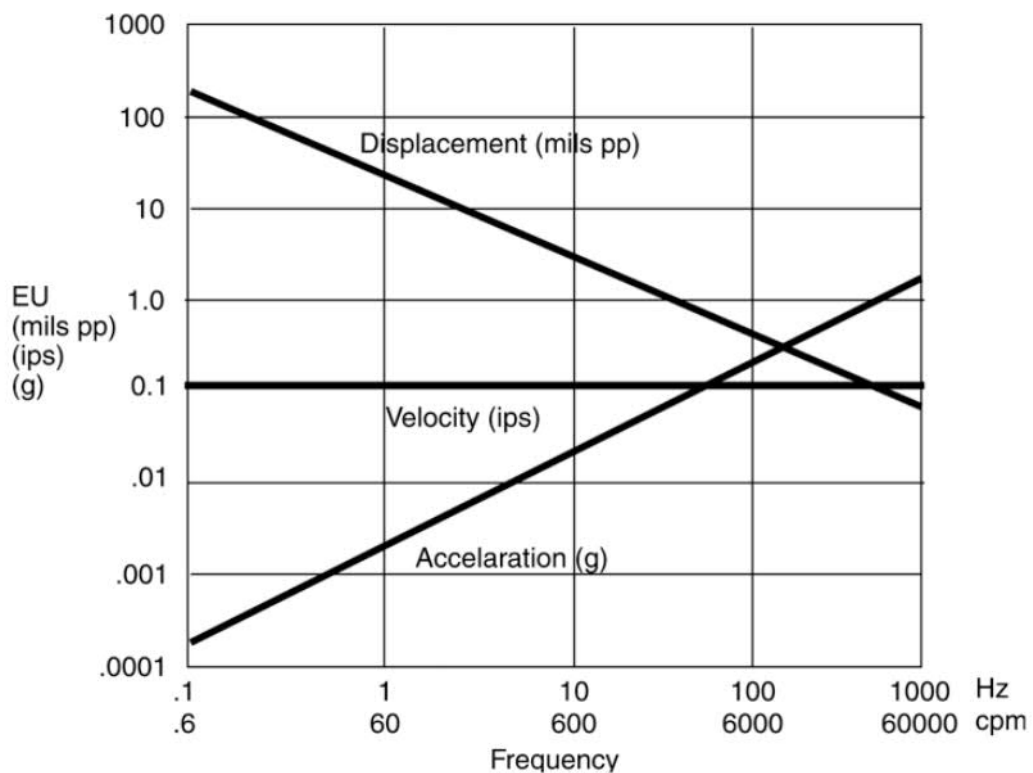
Yllä olevista kuvista voidaan havaita, että viallinen roottorisauva ilmenee noin kaksinkertaisen jättämän päässä syöttötaajuudesta, eli esimerkki kuvissa taajuuksilla 49Hz ja 51Hz. Taajuuksilla olevien amplitudien ero paljastaa viallisen roottorisauvan, sillä viallinen roottorisauva nostaa taajuudella esiintyvän komponentin amplitudia.

4.4.1.3 Oikosulkumoottorin värähtelymittaukset

Värähtelymittauksilla oikosulkumoottorista on mahdollista analysoida koneen dynaamista tasapainoa, laakerivikoja tai erilaisia syöttöjännite ja maadoitusvikoja. Värähtelymittauksen tarkempi teoria ja toimintaperiaate käydään läpi kappaleessa 5.1.

Värähtelymittauksen etuna on sen suuri P-F arvo, eli sitä käyttämällä on mahdollista ennakoida tulevat vikaantumiset jo hyvissä ajoin. Lisäksi sen avulla saadaan hyvin kokonaisvaltaisesti mitattua sekä sähköisiä ongelmia että myös mekaanisia vikoja oikosulkumoottorista.

Värähtelymittauksilla on mahdollista seurata kolmea eri parametria mitattavasta kohteesta: värähtelyn siirtymää, nopeutta ja kiihtyvyyttä. Yleisimmin oikosulkumoottorin mittauksissa seurataan värähtelyn nopeuden tehollisarvoa (RMS), koska se on kohtuullisen herkkä suure laajalla taajuusalueella, lisäksi energiamäärä, joka värähtelyyn on sitoutunut, on lähes verrannollinen värähtelyn nopeuteen. Toisaalta taas matalilla pyörintänopeuksilla pyörivät laitteet reagoivat herkemmin värähtelyn siirtymään ja nopeakäyntiset kiihtyvyyteen [38, s. 50].

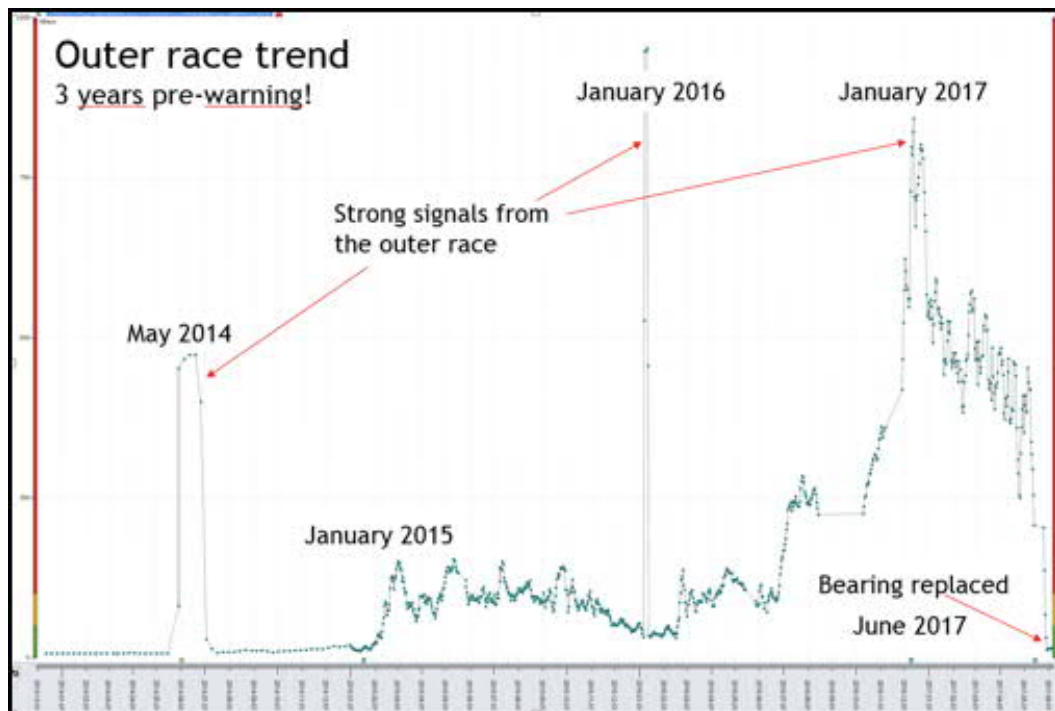


Kuva 55. Suureiden herkkyys värähtelytaajuuteen [39, s. 21]

Yllä olevan kuvan (Kuva 55) avulla voidaan tehdä yleistäviä päätelmiä käytettävästä suureesta värähtelymittauksessa. 10 Hz ja 1000 Hz välillä tapahtuvaa pyörintäliikettä on hyvä mitata nopeudella ja tätä suurempia kiihtyvyydellä sekä pienempiä siirtymällä. Tämä tarkoittaa, että koneita, jotka pyörivät 600 rpm ja 60 000 rpm välillä suositellaan

mitattavaksi nopeussuurella. Käytännössä tähän väliin menevät suurin osa oikosulkumoottoreista.

Oikosulkumoottoreiden laakereiden valvontaan on olemassa myös menetelmä, joka perustuu kiihtyvyyssantureihin. SPM (Shock Pulse Method) eli iskusysäysmenetelmällä voidaan tarkkailla tarkemmin laakereiden kuntoa. Sillä saadaan tietoa esimerkiksi voiteluainekalvon paksuudesta sekä voitelutilanteesta yleensäkin. Menetelmä perustuu 32kHz taajuudella resonoivaan kiihtyvyyssanturiin [40]. SPM menetelmä soveltuu erityisesti hitaasti pyöriville koneille ja niiden laakereiden kunnonvalvontaan. Menetelmällä voidaan saavuttaa hyvinkin suuria P-F arvoja, esimerkkitapauksena erään toteutetun rummun laakereiden valvonta SPM menetelmällä.



Kuva 56. SPM:n avulla havaittu laakerivaurio rummussa [41, s. 10]

Yllä olevasta kuvasta (Kuva 56) nähdään, että ensimmäiset merkit laakerin vikaantumisen saatu kolme vuotta ennen kuin itse vikaantuminen tapahtui. Tämä antaa hyvin aikaa valmistautua laakerin vaihtamiseen.

Värähtelymittauksia suoritettaessa laakerille on laakerin geometria tunnettava. Tämän avulla voidaan laskea, millä taajuuksilla oletettavasti erilaiset vikaantumiset esiintyvät. Alla olevilla kaavoilla voidaan laskea vikojen esiintymistaajuuDET [14, s. 32] [45, s. 79]:

- Ulkokehän viat:

$$f_o = \frac{N}{2} f_a \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (10)$$

- Sisäkehän viat:

$$f_i = \frac{N}{2} f_a \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (11)$$

- Vierintäelementin häkin viat:

$$f_c = \frac{1}{2} f_a \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (12)$$

- Vierintäelementin viat:

$$f_b = \frac{D}{2d} f_a \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 (\cos \alpha)^2 \right) \quad (13)$$

jossa

f_o = ulkokehäaurion esiintymistaajuus [1/s]

f_i = sisäkehäaurion esiintymistaajuus [1/s]

f_c = vierintäelementin häkin vaurioiden esiintymistaajuus [1/s]

f_b = vierintäelementin vaurioiden esiintymistaajuus [1/s]

N = vierintäelementtien määrä [kpl]

f_a = akselin pyörintänopeus [1/s]

d = vierintäelementin halkaisija [mm]

D = vierintäuran keskihalkaisija [mm]

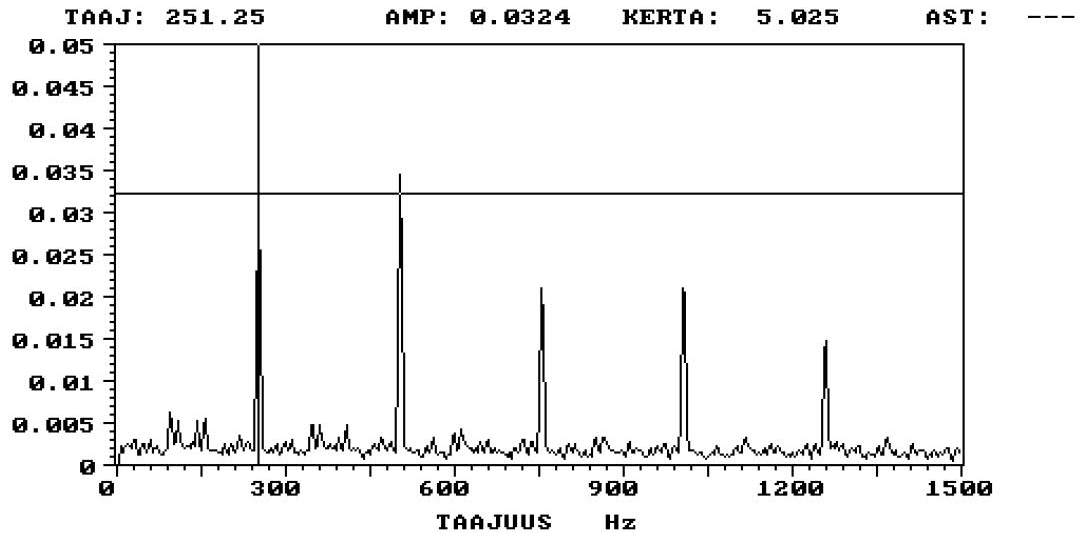
α = vierintäelementin kosketuskulma [°]

Kaavojen 10-13 avulla on laskettu laitteistossa olevan pyöritysmoottorin laakereiden vikataajuudet pyörintänopeudella 1000 rpm alla olevaan taulukkoon (Taulukko 9). Pyörintänopeuden kasvaessa myös vikojen esiintymistaajuudet kasvavat lineaarisesti. Kappaleiden liukua ei ole otettu huomioon, eli liukumiskerroin laskelmissa on 1.

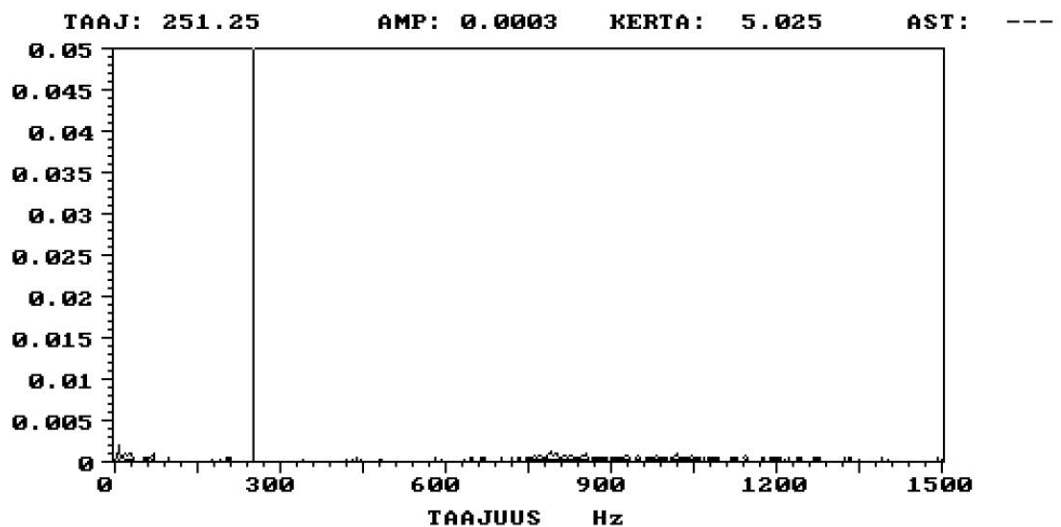
Taulukko 9. Pyöritysmoottorin laakereiden vikataajuudet 1000 rpm

Ulkokehän vikaantumistaajuudet	59,6 Hz
Sisäkehän vikaantumistaajuudet	90,4 Hz
Vierintähäkin vikaantumistaajuudet	6,6 Hz
Vierintäelementin vikaantumistaajuus	39,0 Hz

Verhokäyräanalyysin avulla voidaan seurata kyseisiä taajuuksia ja niissä ilmeneviä amplitudipiikkejä. Amplitudipiikit ilmenevät myös näiden taajuuksien harmonisilla kerrannaisilla. Alla olevissa kuvissa on mittaustulos, sekä ehjästä että ulkokehävaurioisesta laakerista.



Kuva 57. Ulkokehävaurioisen laakerin verhokäyräanalyysi [40, s. 16]



Kuva 58. Ehjän laakerin verhokäyräanalyysi [40, s. 16]

Yllä olevia kuvia (Kuva 57 ja Kuva 58) vertaamalla voidaan havaita, miten verhokäyräanalyysissä näkyy laakerivaurio ja sen harmoniset kerrannaiset.

Värähtelylle ja tärinälle on asetettu standardissa ISO 2372 erilaisia ohjearvoja tärinän nopeuden tehollisarvon suuruudelle ja sen vakavuudelle. Taulukon mukaan esimerkiksi laitteistossa olevan pyöritysmoottorin vaurioraja värähtelyn nopeuden tehollisarvon perusteella on noin 7,1 mm/s. On syytä kiinnittää huomiota, että tarkastelussa on käytetty tehollisarvoja, eikä huippuarvoja (*Liite C: ISO 2372 – värähtelyluokitukset [37]*).

Vastaavanlaisen asettelun värähtelyn vakavuudelle voidaan tehdä myös standardin PSK 5705 mukaan, jossa asetetaan hälytysraja ja vaurioraja laitteen jokaiselle mittapisteele pohjautuen sen todelliseen käyttötilanteeseen. Raja-arvot lasketaan seuraavilla kaavoilla 14 ja 15 [38, s. 102-106]:

- Hälytysraja, jolloin on syytä suorittaa vika-analyysi ja tehostaa kunnonvalvontaa:

$$HÄLYTYSRAJA = 1,6\bar{x} + 2\sigma \quad (14)$$

- Vaurioraja, jolloin koneen käytön jatkamista pitäisi välttää, sekä selvittää syy kohonneeseen tärinäarvoon:

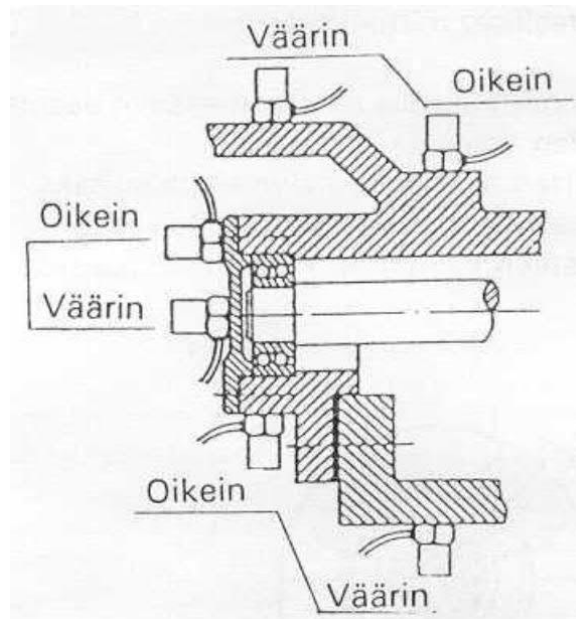
$$VAURIORAJA = 4\bar{x} + 2\sigma \quad (15)$$

jossa \bar{x} = värähtelynopeuden keskiarvo

σ = värähtelynopeuden keskihajonta

Seuraamalla näitä raja-arvoja samalla kierrosnopeudella, voidaan laitteen kuntoa seurata täsmällisemmin. Tärinän muutokset saattavat olla kuitenkin lyhytaikaisia, jolloin kaikkiin yksittäisiin tapauksiin ei ole syytä kiinnittää tarkempaa huomiota. Jos tärinäarvot ylittyvät säännöllisesti tai ovat muuten erittäin korkeita tavanomaisiin arvoihin nähden, on syytä epäillä jonkinasteista vaurioita ja suorittaa tarkempi vika-analyysi [38, s. 105].

Värähtelymittauksia suoritettaessa on tärkeää, että anturi on kiinnitetty oikein, sillä anturin kiinnitystapa ja -paikka vaikuttavat merkittävästi tuloksiin. Oikosulkumoottoria tarkasteltaessa pitäisi mittaukset suorittaa kuudesta eri kohtaa, eli kolmesta kohtaa kummaltakin päätylaakerilta. Mittaukset tulee tehdä vaaka-, pysty- ja akselinsuuntaisesti. Lisäksi anturin kiinnittämistapa vaikuttaa suuresti saatuihin arvoihin. Kaikista paras tapa kiinnittää anturi on kiinteällä asennuksella mahdollisimman lähelle värähtelevää kohdetta [38, s. 53].



Kuva 59. Värähtelymittausanturin kiinnityskohdat [38, s. 53]

Kuva 59 näyttää oikeaoppiset paikat värähtelymittausanturin kiinnitykselle. Kiinnityskohdissa on syytä välttää erillisiä ulokkeita ja raja-/ tiivistepintoja, sillä värähtely menettää osan energiastaan näissä kohdin [38, s. 54].

4.4.1.4 Oikosulkumoottorin kunnonvalvonta sähköisten suureiden avulla

Tärkeimpiä suureita valvottaessa oikosulkumoottorin kuntoa sähköisillä mittauksilla, on tarkkailla sitä syöttävän kolmivaihejärjestelmän staattorivirtoja sekä -jännitteitä. Oikosulkumoottorin sisäiset muutokset näkyvät staattorivirroissa roottorivirtojen ja ilmvälin kautta. Kokonaisuudessaan staattorivirta muotoutuu syötettävän virran perustaajuudesta, sen harmonisista taajuuksista sekä erilaisten muutosten aikaansaamista taajuuden lisäkomponenteista [1, s. 386]. Tarkkailemalla staattorivirran spektriä ja symmetrisyyttä saadaan tietoa koneen tämän hetkisestä toimintatilasta.

Staattorivirran spektrianalyysillä voidaan päätellä esimerkiksi ilmvälin epäkeskeisyyttä ja roottorisauvojen kuntoa, kuten murtumia tai valuhuokoisuuksia [13, s. 37]. Toisaalta ilmvälin epäkeskeisyyttä voi olla vaikea havaita ilman, että staattorikäämit magnetisoidaan DC-jännitteellä. Tämä johtuu siitä, että DC-virta sisältää vain yhden taajuuskomponentin, eikä siihen vaikuta moottorin ilmvälissä olevien epälineaarisuuskohtien olemassaolo, kuten roottoriurat [14, s. 62].

Mitattaessa staattorivirtaa on syytä myös mitata samalla tarkka pyörintänopeus roottorille. Tällöin saadaan moottorin jättämä selville. Jättämän avulla voidaan laskea, millä taajuuksilla mahdolliset roottoriviat näkyvät spektrianalyysissä. Taajuudet, joilla roottorisauvojen viat esiintyvät, voidaan laskea seuraavalla kaavalla [13, s. 39]:

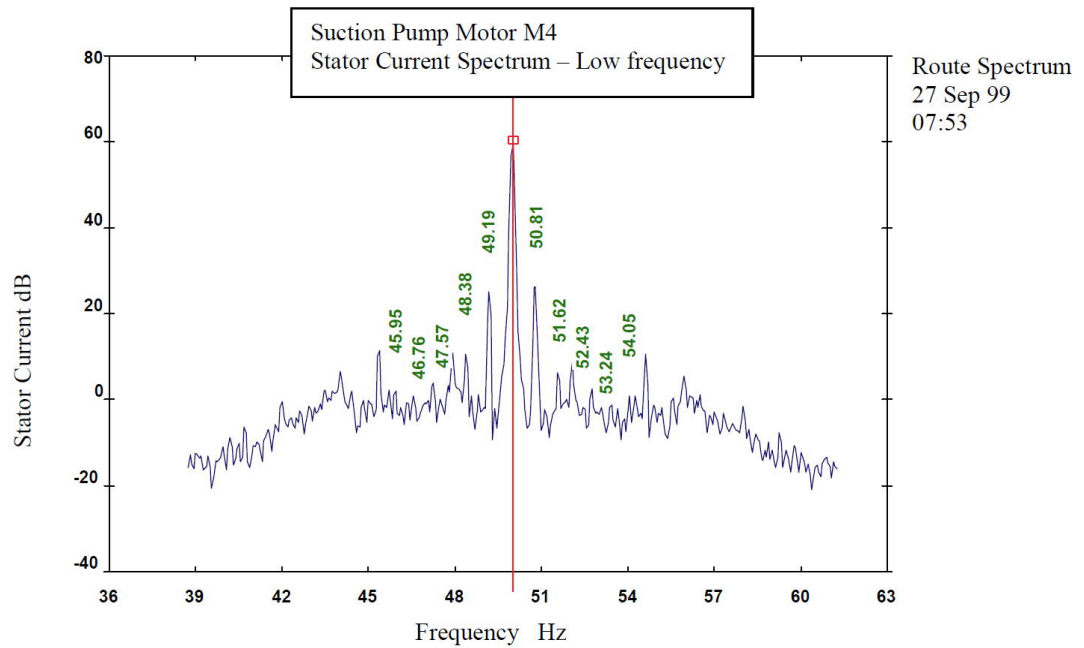
$$f_r = f_s(1 \pm 2s) \quad (16)$$

jossa $f_r = \text{roottorivikojen esiintymistaaajuus [1/s]}$

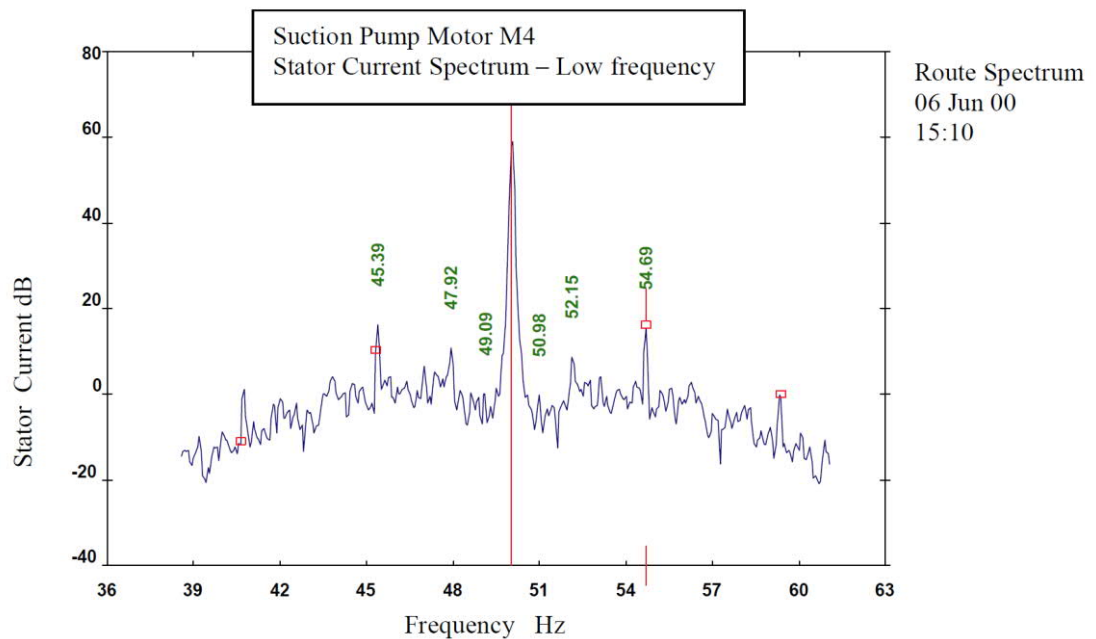
$f_s = \text{syöttötaaajuus/ synkroninen taajuus [1/s]}$

$s = \text{jättämä [-]}$

Vikaantunut roottorisauva näkyy Kaavan 16 esittämällä taajuuksilla suurempina amplitudeina



Kuva 60. Staattorivirtaspektri viallisia roottorisauvoja sisältävästä oikosulkumoottorista [36, s. 90]



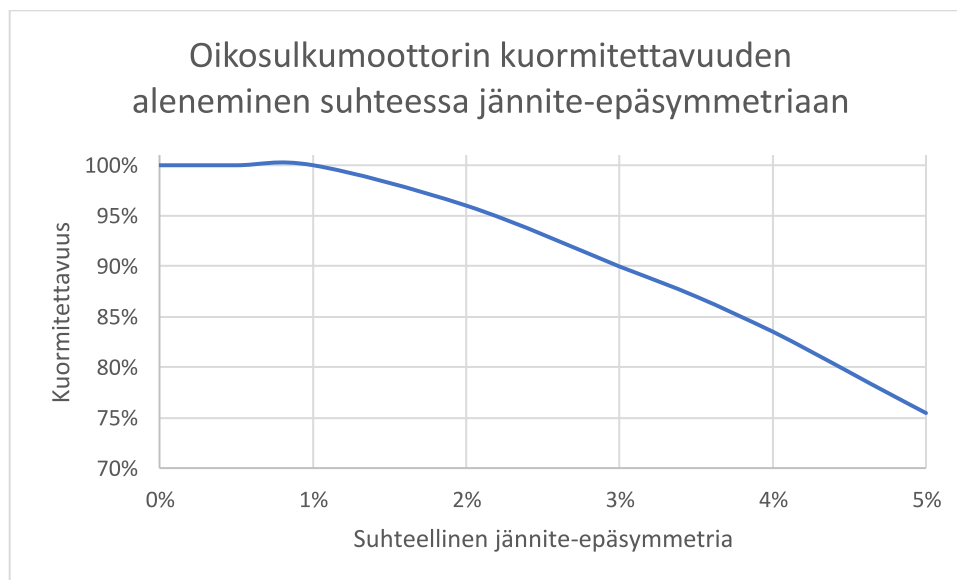
Kuva 61. Staattorivirtaspektri ehjästä oikosulkumoottorista [36, s. 92]

Yllä olevista kuvista (Kuva 60 ja Kuva 61) on havaittavissa, että syöttötaajuuden molemmiin puolin kaksinkertaisen jättämän päässä näkyvät amplitudipiikit, kun oikosulkumoottorissa on viallisia roottorisauvoja.

Mitattaessa staattorivirtojen symmetrisyyttä, yleisin syy epäsymmetrisyydelle ei löydy itse moottorista vaan syöttöverkosta. On kuitenkin syytä kiinnittää huomiota virtojen ja jännitteiden epäsymmetrisyydelle, sillä kasvaessaan ne aiheuttavat suuria häviöitä

lämpenemisen muodossa sähkökoneessa. Varsinkin jännite-epäsymmetrian kasvaessa se aiheuttaa nopeasti suuren virtaepäsymmetrian.

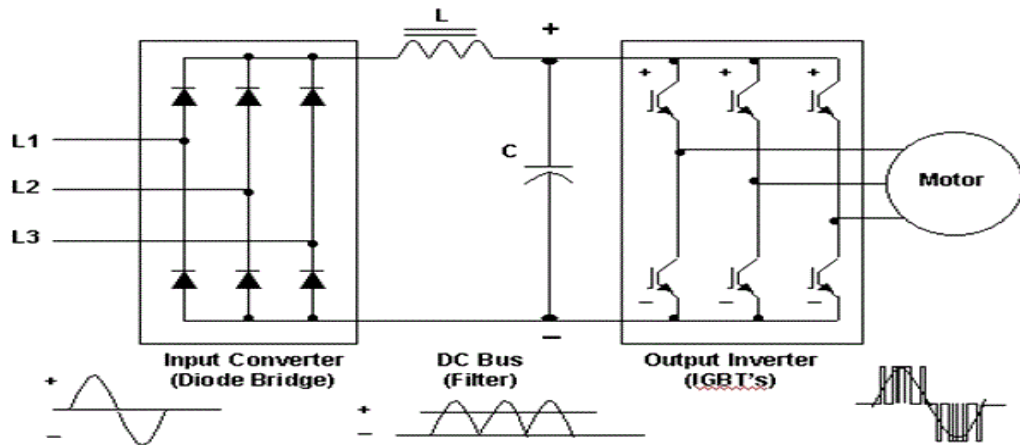
Standardi IEC 60034-1 antaa viitteet moottorin toimimiselle syöttöjännitteen ollessa epäsymmetrinen. Moottorin täytyy toimia normaalisti vielä, kun jännite-epäsymmetria on alle 1 % tai jos epäsymmetria nousee lyhytaikaisesti 1,5 %. Alla oleva Kuva 62 esittää jännite-epäsymmetrian vaikutuksen moottorin kuormitettavuuteen [13, s. 38].



Kuva 62. Jännite-epäsymmetrian vaikutus oikosulkumoottorin kuormitettavuuteen [13, s. 38]

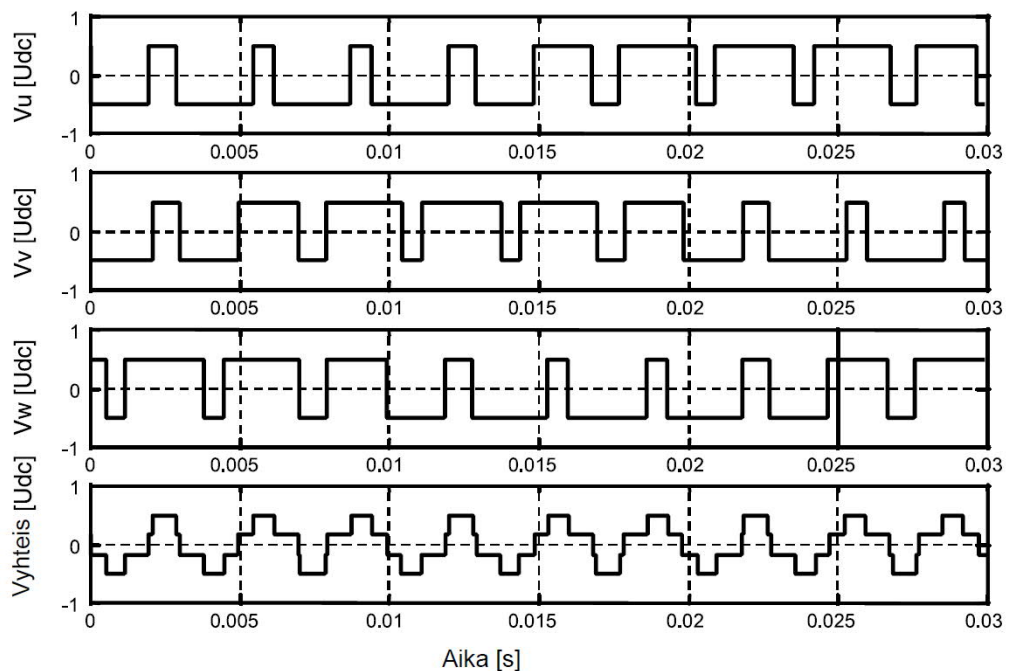
Kuvasta on luettavissa, että epäsymmetrian kasvaessa moottorin kuormitettavuus laskee melko nopeasti. Esimerkiksi epäsymmetrian ollessa 2% kasvaa moottorin lämpenemä noin 7% - 12%. Tästä syystä staattorivirtojen epäsymmetrioita on syytä tarkkailla. Näin voidaan ennaltaehkäistä mahdollisesti ylikuormittamisesta ja lämpenemisestä johtuvat vauriot.

Akselijännitteiden ja laakerivirtojen aiheuttamat ongelmat ovat lisääntyneet oikosulkumoottorien laakeroinneissa, johtuen uusista taajuusmuuttajakäytöistä. Taajuusmuuttajissa käytetyillä IGBT-transistoreilla saavutettava erittäin nopea kytkentätaajuus osaltaan suurentaa mahdollisuutta laakerivirtojen syntymiselle [12, s. 5]. Suurimman ongelman taajuusmuuttajat aiheuttavat johtuen niiden rakenteellisesta toiminnasta. Niiden toiminta perustuu syöttöjännitteen tasasuuntaamiseen tasajännitteeksi, joka vaihtosuunnataan uudelleen vaihtojännitteeksi moottorille. Alla oleva Kuva 63 selventää yksinkertaista taajuusmuuttajan toimintakaaviota.



Kuva 63. Taajuusmuuttajan yksinkertaistettu piirikaavio [42]

Yllä olevasta kuvasta voidaan havaita, kuinka tasasuuntaaminen tapahtuu kolmivaiheisesta syöttöjännitteestä. Tasasuuntauksen jälkeen jännite on vielä vaihtosuunnattava uudelleen esimerkiksi IGBT-transistoreilla. Tämän tyyppinen järjestely mahdollistaa moottorille syötettävän jännitteen taajuuden ja amplitudin muuttamisen halutun kaltaiseksi. Tästä syntyy kuitenkin ongelmia, kuten virran vääristymistä, sekä syöttöverkkoa että syötettävää verkkoa silmällä pitäen. Kuva 64 selvittää moottorille tulevassa jännitteessä ilmeneviä ongelmia.



Kuva 64. Tyypillisen kolmivaiheisen PWM-ohjatun taajuusmuuttajan jännitteet [12, s. 8]

Koska yhteismuotoinen jännite ei ole nolla, se muodostaa piiriin yhteismuotoisen virran, joka purkautuu erilaisten hajakapasitanssien kautta. Virtapurkauksen kiertoreitti voi

mennä esimerkiksi laakerin kautta, jolloin se aiheuttaa sähköistä eroosiota laakeripinnoilla.

Laakerivirtoja voi syntyä lähinnä kolmella eri tapaa, joista yleisin teollisuusosikuumoottoreissa on induktiivisesti syntyneet vuotovirrat. Tällöin staattorirautaan vuotaa käämeistä virtaa, joka on riippuvainen käämin ja rungon välisestä kapasitanssista, että myös jännitteen nousunopeudesta. Staattoriraudasta virran pitäisi maadoittua moottorin rungon suojamaan kautta takaisin lähteeseen. Nämä virrat muodostavat ympärilleen magneettivuon, joka vaihtelee suuruudeltaan käämin eri päissä. Tästä aiheutuu potentiaaliero akselin eri päiden välille, joka synnyttää kiertävän virran akselin ja staattorin rungon välille. Muita tapoja laakerivirtojen syntyyn on muun muassa akselinmaadoitusvirrat, jossa potentiaaliero moottorin rungon ja maadoitetun akselin välillä aiheuttaa jännitepurkauksia, tai kapasitiiviset purkausvirrat, jotka ovat yleisempiä lähinnä pienillä koneilla [12, s. 6-14].

Standardissa PSK 7708 on annettu ohjeellisia arvoja vierintälaakerikäytössä ilmeneville laakerivirroille ja -jännitteille. Alla olevissa taulukoissa on listattu sekä virran huippuarvon vaikutus, että jännitepulssien huippuarvon vaikutus laakerin käyttöikään.

Taulukko 10. *Vaihtovirtajännitepulssien haitallisuusaste PSK 7708*

AC-JÄNNITEPULSSIN HUIPPUARVO	HAITALLISUUSLUOKITUS
< 3 V	Ei haitallinen
3 V – 10 V	Mahdollisesti haitallinen
> 10 V	Haitallinen laakereille

Taulukko 11. *Laakerivirran haitallisuusaste PKS 7708*

LAAKERIVIRRRAN HUIPPUARVO	HAITALLISUUSLUOKITUS
< 1 A	Ei haitallinen
1 A – 2 A	Mahdollisesti haitallinen
> 2 A	Haitallinen laakereille

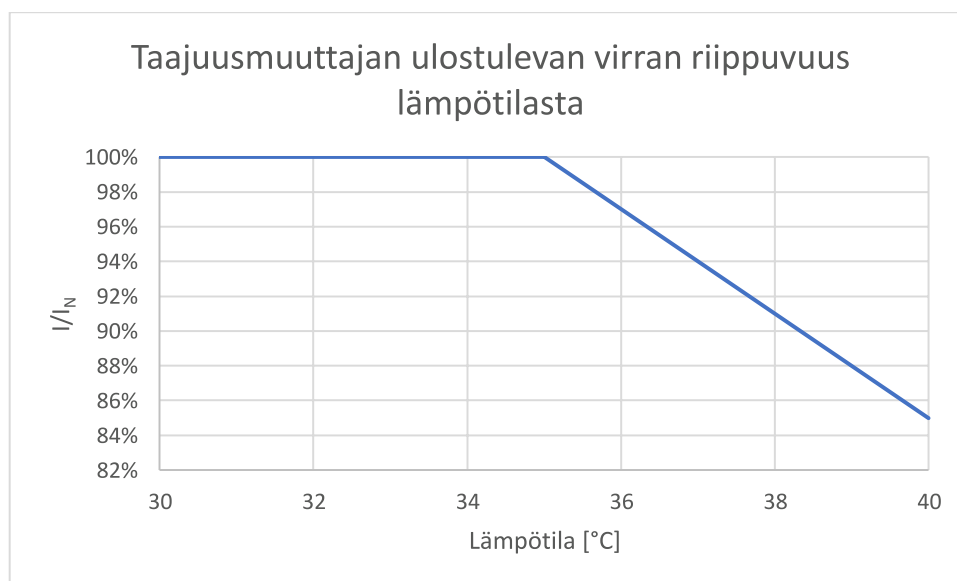
Laakerivirtoja voidaan ennaltaehkäistä muun muassa eristämällä käytettävät laakerit. Niin kutsutut hybridi-laakerit, eli keraamiset laakerit, joissa vierintäelementteinä on käytetty keraamisia osia ovat yksi esimerkki laakereiden eristämisestä. Oikeanlaisella kaapeloinnilla ja maadoitusjärjestelmillä on myös tärkeä rooli pyrittäessä vähentämään laakerivirtoja. Tavoitteena on alentaa laakerijännitteet niin pieniksi, että läpilyöntiä ei pääse tapahtumaan. Yksi tällainen keino on myös käyttää dU/dt suodatinta taajuusmuuttajakäytöissä. Tämä alentaa jännitteen nousunopeutta, joka vähentää kiertovirtoja staattorirungon ja akselin välillä [12, s. 15-17].

Laakerivirtojen mittaaminen on hieman hankalaa sähköisillä mittauksilla, mutta se onnistuu esimerkiksi Rogowski-tyyppisellä virta-anturilla. Helpompi tapa havaita laakerivirtoja on seurata moottoria värähtelymittauksilla.

4.4.2 Taajuusmuuttajat

Taajuusmuuttajan sisäiset viat liittyvät useimmiten sen toimintalämpötilan oikeellisuuteen. On hyvin tärkeää, että se toimii suunnitellussa toimintaympäristössä. Tämän vuoksi tärkein ennaltaehkäisevä toimenpide taajuusmuuttajan vikaantumiselle on pitää huoli, että sen jäähdytys toimii oikein. Lämpönielun puhdistaminen pölystä ja tuulettimen toiminnan tarkastaminen vähintään kerran vuodessa on suotavaa.

Harvemmin ilmeneviä vikoja voi tulla esiin kondensaattoreiden toiminnassa. Niiden toimintaelinikä on kuitenkin jopa 100 000 tuntia, jolloin niiden voidaan olettaa kestävän lähes koko käyttöiän. Kondensaattoreiden vikaantumista on haasteellista ennustaa, mutta niiden toimintakykyyn voidaan vaikuttaa pitämällä huoli oikeista toimintaolosuhteista. Alla oleva Kuva 65 selventää taajuusmuuttajan toimintakyvyn riippuvuutta lämpötilasta.



Kuva 65. Taajuusmuuttajan ulostulevan virran riippuvuus lämpötilasta [43, s. 53]

Yllä olevasta kuvasta voidaan havaita, kuinka tarkasteltavassa laitteistossa olevan taajuusmuuttajan suorituskyky laskee, kun sen toimintalämpötila nousee. Jo 5°C lämpötilan nousu 35°C:seen jälkeen pudottaa suorituskykyä 15 %-yksikköä.

Pääosin taajuusmuuttajia voidaan pitää melko luotettavina, sillä niissä ei varsinaisesti ole kuluvia liikkuvia osia. Taajuusmuuttajan vikaantumisiin pätee hyvin samankaltaiset asiat kuin ylipäättänsä elektroniikkapiireihin. Tästä johtuen pääosa vioista ilmenee ja aiheutuu laitteen ulkopuolella toimivista komponenteissa, kuten moottoreissa tai antureissa [33, s. 12].

Taajuusmuuttajassa itsessään on logiikka, joka tunnistaa erilaisia vikatilanteita. Tunnistettavat vikatilanteet voivat olla ohjelmallisia, toimilaitteesta tai ympäristöolosuhteista johtuvia. Jokainen vikatilanne tallentuu taajuusmuuttajan vikamuistiin, josta se on myöhemmin luettavissa. Lisäksi taajuusmuuttajan näytölle ilmestyy kuvaus vikatilasta automaattisesti vian ilmestyessä [16].

4.4.3 Ohjelmistot

Ohjelmistovikoihin vaikuttaminen on hyvin hankalaa järjestelmän käyttäjälle, koska ohjelmistoviat ovat aina peräisin suunnittelusta. Oikeanlaisella käytöllä kuitenkin voidaan vaikuttaa siihen kuinka hyvin ohjelma suorittaa haluttuja toimintoja. On siis tärkeää, että käyttäjä tuntee kuinka ohjelmistoa tulisi käyttää oikeaoppisesti. Tämä helpottaa myös mahdollisten vikatilanteiden kuvaamista, missä ja millaisessa käytössä vikatilanne ilmenee [4, s. 60-62].

Ohjelmistovikojen olemassaolo johtuu lähinnä siitä, että käyttöliittymä on liian monimutkainen tai ohjelmistoa ei ole voitu testata kokonaan ennen käyttöönottoa.

Ohjelmistovikoihin pätee kuitenkin yleisesti se, että vikojen määrä ajan kuluessa pienenee. Tämä poikkeaa hieman tavanomaisen laitteiston virhekäyrästä, jossa eliniän loppupuolella vikojen määrä nousee. Tästä syystä pelkälle ohjelmistolle ei voida laskea MTBF arvoa, sillä vikatiheys ei ole yleensä ennustettavissa. Alla oleva Kuva 66 kuvastaa ohjelmistovikojen määrän kehittymistä suhteessa aikaan.



Kuva 66. Ohjelmistovikojen tyypillinen kehittyminen suhteessa aikaan [4, s. 65]

Yllä olevasta kuvasta voidaan havaita, että ohjelmistovikojen määrä tyypillisesti vähenee ajan kuluessa. Tämä johtuu siitä, että ohjelmistoissa ei ole mekaanisesti kuluvia osia, joten ne eivät kulu tai ikäänny käytössä.

Ohjelmistovikojen ennakointi on käytännössä mahdotonta, joten niiden mittaaminen ennakoivan kunnossapidon osalta on saavutettujen hyötyjen osalta melko vähäistä. Ohjelmistovikojen määrien mittaamisella ja seuraamisella voidaan tosin osata kiinnittää huomiota oikeaan paikkaan, mikäli vikojen määrä on suuri suhteessa muihin vikoihin. Tällöin voidaan keskittyä parantamaan ohjelmaa. Tämän työn puitteissa ei kuitenkaan keskitytä seuraamaan tai ennakoimaan ohjelmistovikoja sen enempää kuin mitä niitä ilmenee laitteiston käytön aikana.

5. KUNNONSEURANTAAN MITTALAITTEITA

TYÖKALUJA/

Yrityksen aloittaessa suorittamaan ennakoivaa kunnossapitoa, on tärkeää määritellä oikeat tavoitteet ja tavat, joilla tavoitteita lähdetään saavuttamaan. Tärkeä osa-alue heti alkuvaiheessa on huomioida käytettävät mittalaitteet, joilla kunnonvalvontaa suoritetaan. Kunnonvalvonnan automaatioaste antaa kehukset sille, minkälaisia työkaluja ja menetelmiä tarvitaan mittauksia suoritettaessa. Täysin automatisoitu järjestelmä ei vaadi erillisiä mittauksia, vaan laitteiston kunto välittyy anturitietojen kautta verkkoon, josta se on kunnossapitohenkilöiden tarkasteltavissa. Sen sijaan toisessa äärilaidassa sähköisiä mittauksia ei suoriteta ollenkaan, vaan laitteiden kuntoa valvotaan aistinvaraisin menetelmin. Yritykselle sopivan kunnonvalvonta-asteen määrittäminen on tärkeä osa ennakoivan kunnossapidon aloittamista. Lisäksi se antaa suuntaa, millaisia työkaluja yrityksen on hankittava [1, s. 103].

Alla olevissa alakappaleissa on käyty läpi tyypillisimpiä työkaluja, joita yritys voi hyödyntää suorittaessaan ennakoivaa kunnossapitoa. Kappaleissa on selvennetty millaisiin käyttökohteisiin menetelmät soveltuvat ja millaisia eri vaihtoehtoja kyseisen menetelmän mittaukseen on olemassa.

5.1 Värähtelymittaus

Yksi suosituimmista ja eniten käytetyistä menetelmistä teollisuuden kunnonvalvonnassa on erilaiset värähtelymittaukset. Niitä voidaan käyttää niin ennakoivassa kunnonvalvonnassa kuin vikojen juurisyiden selvittämisessä [38, s. 17].

Tyypillisimmät käyttökohteet, joissa voidaan soveltaa värähtelymittauksia kunnonvalvonnassa ovat:

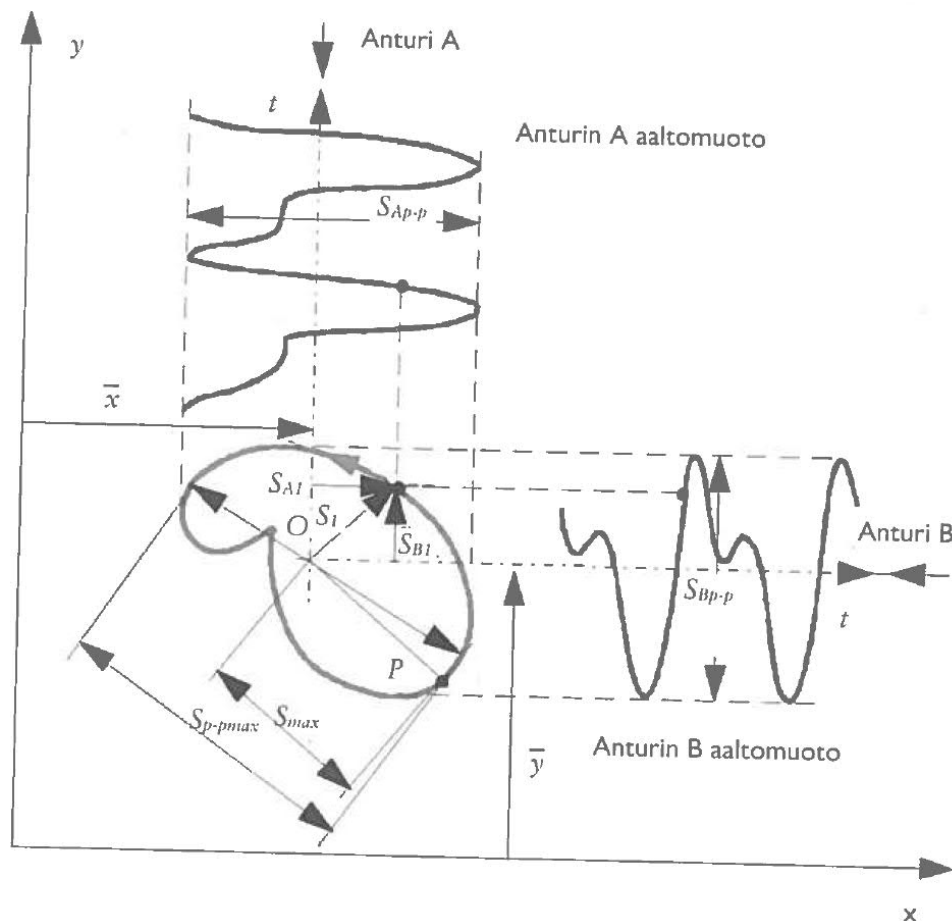
- Moottorit
- Puhaltimet/ tuulettimet
- Ketju- ja hihnavälitykset
- Vaihteistot
- Pumpit
- Kompressorit

Yleistykseenä voidaan sanoa, että kaikkia pyöriviä koneita voidaan valvoa mittaamalla sen värähtelyä [47, s. 2].

Värähtelyn mittaaminen voidaan jakaa kolmeen eri suureen mittaamiseen: siirtymään, nopeuteen ja kiihtyvyyteen. Jokainen näistä suureista kuvastaa hieman eri tavalla värähtelyä, joten ne sopivat kaikki hieman eri tilanteisiin. Onkin tärkeää tiedostaa ennen värähtelymittarin hankkimista sen tuleva käyttötarkoitus.

5.1.1 Siirtymän mitta

Siirtymän mittaaminen perustuu useasti pyörrevirta-antureihin ja sitä käytetään yleensä alle 200 Hz taajuuksien mittaamiseen. Siirtymän mittaaminen on tehokasta esimerkiksi liukulaakerikäytöissä. Tällöin kahdella toisiinsa 90° kulmaan sijoitetulla pyörrevirta-anturilla saadaan selville akselin todellinen liikerata laakerin sisällä. Kuva 67 esittää kahden pyörrevirta-anturin avulla piirrettyä akselin ratakäyrää.



Kuva 67. Siirtymän avulla piirretty akselin ratakäyrä liukulaakerissa [1, s. 236]

Yllä olevasta Kuvasta 45 voidaan havaita akselin epäkeskeisyys liukulaakerin sisällä. Anturin induktanssi muuttuu suhteessa mitattavan kappaleen etäisyyteen. Tämän avulla saadaan dataa mittakappaleen asemasta. Pyörrevirta-antureiden käyttöä kuitenkin rajoittaa niiden alhainen taajuusalue, pieni dynamiikka ja haasteellinen kiinnitystapa [1, s. 235].

5.1.2 Nopeuden mittaus

Värähtelyn nopeuden mittaaminen on yksi yleisimmistä suureista, joiden avulla laitteiden kuntoa mitataan. Tämä johtune laajasta taajuusalueesta ja kohtuullisen suuresta dynamiikasta. Nopeuden mittaamisen yleisimmät anturit ovat joko seismisiä nopeusantureita, geofoneja, tai integraattorilla varustettuja pietsosähköisiä kiihtyvyysantureita.

Seismiset nopeusanturit perustuvat magneettiin, joka pääsee liikkumaan kelan sisällä. Kun anturiin kohdistuu liikettä, magneetti liikkuu kelan sisällä, joka indusoi jännitteen. Indusoituneesta jännitteestä voidaan laskea liikkeen nopeus, joka on suoraan verrannollinen jännitteeseen. Tyypillisimmin seismisiä antureita käytetään maaperään kohdistuviin mittauksiin, koska ne ovat melko suurikokoisia. Lisäksi niiden herkkyys magneetikentille, sekä anturin oikealle suuntaamiselle, tuovat oman haasteensa niiden käytettävyydelle. Teollisuuskäytössä niitä käytetään kuitenkin yhä vähän turbo- ja mäntäkoneissa, mutta niiden käyttö on vähenemässä [1, s. 236-237].

Elektronisella integraattorilla varustettuja pietsosähköisiä antureita käytetään korvaamaan vanhoja järjestelmiä. Anturin toiminta perustuu kiihtyvyyden mittaamiseen ja signaalista suoritettavaan integrointiin. Integroimalla kiihtyvyyttä saadaan tulokseksi nopeussignaali.

5.1.3 Kiihtyvyyden mittaus

Kiihtyvyysanturin käyttäminen on tällä hetkellä yleisin menetelmä värähtelyn mittaamiselle. Varsinkin pietsosähköiset anturit, joiden pieni koko, huolto- ja käyttövarmuus sekä laaja taajuus- sekä dynamiikka-alue puoltavat niiden käyttöä, ovat yleisimpiä antureita värähtelyn mittaamiselle. Varsinaisesti kiihtyvyyden käyttö signaalisuurena on yleisempää suurilla taajuusalueilla, mutta integroimalla kiihtyvyyssignaali se voidaan muuttaa nopeussignaalksi [1, s. 237-238].

Rakenteeltaan pietsosähköiset anturit voidaan jakaa karkeasti puristuksella ja leikkaukselle herkkiin antureihin. Niiden toimintaperiaate on kuitenkin lähes samanlainen, anturin sisällä olevaan seismiseen massaansa kohdistuu voima, joka on kiihtyvyyteen suoraan verrannollinen Newton toisen lain mukaan. Kiihtyvyys muodostaa anturissa olevaan pietsoelementtiin varauksen, jonka suuruuden perusteella saadaan kiihtyvyyssignaali.

Pietsoelementtian turin käyttöä rajoittaa lähinnä alataajuusalueilla sen oma varauksen vahvistusjärjestelmä sekä pienet kiihtyvyydetasot. Korkeataajuusalueella anturin oma resonanssitaajuus saattaa häiritä mittaustuloksia. Anturin resonanssitaajuutta on kuitenkin käytetty hyväksi esimerkiksi SPM värähtelymittauksessa, jossa tunnetun 32kHz resonanssitaajuuden avulla saadaan tietoa laakerin kunnosta. Yleistykseenä

anturin valinnalle voidaan pitää sääntöä, että pienet anturit mittaavat korkeita kiihtyvyyksiä ja taajuuksia ja suuret anturit ovat matalia taajuuksia ja kiihtyvyyksiä varten [1, s. 238-239].

Valittaessa kiihtyvyyssanturia on syytä kiinnittää huomiota ainakin anturin herkkyyteen, ympäristöolosuhteisiin sekä kiinnitysalustaan. Anturin herkkyyttä tarkasteltaessa on syytä tiedostaa myös sen herkkyyssuuntaisuutta väreilylle. Yleensä antureiden mitta-alue on vain yksiakselinen, eli se mittaa vain yhden suuntaista värähtelyä. On myös olemassa kolmiakselisia antureita, jotka mittaavat joka suuntaan tapahtuvaa värähtelyä. Ympäristöolosuhteista on tärkeää tiedostaa toimintalämpötila, sillä lämpötila vaikuttaa jonkin verran anturin herkkyyteen [1, s. 240].

5.1.4 Värähtelymittausten tulevaisuus

Tulevaisuudessa värähtelyä mittaamaan on kehitetty erilaisia laser- ja MEMS-antureita (**M**icro **E**lectro **M**echanical **S**ystems). Laserantureiden etuna on niiden monipuoliset mittaamenetelmät sekä kosketukseton mittaus. Tämä mahdollistaa jopa metrien pituisen mittaetäisyyden. MEMS-antureiden etuna on niiden todella pieni koko sekä vähäinen energiankulutus.

MEMS-anturit perustuvat piikiekkoihin sijoitettuihin antureihin, joilla voidaan mitata käytännössä lähes mitä tahansa. Niiden monipuolisuus ja pieni koko helpottavat antureiden asentamista vaikeisiin paikkoihin. Värähtelymittauksissa MEMS-antureita voidaan käyttää kiihtyvyyssantureina. Tällä hetkellä on kehitetty muun muassa kuusiakselisia antureita, joissa on kolmiakselinen kiihtyvyyssmittaus sekä kolmiakselinen gyroskooppimittaus. Kunnonvalvonnassa tällaista voitaisiin käyttää esimerkiksi varmistamaan oikea linjaus sekä valvomaan värähtelyn tasoa [48].

5.1.5 Värähtelymittausten vaikutus yritykselle

Riippuen yrityksen asettamista tavoitteista ennakoivan kunnossapidon osalta ja käytössä olevasta laitteistosta, värähtelymittauksien toteuttamiseen kohdistettavat investoinnit vaihtelevat huomattavasti. Halvimmillaan yksinkertaisen käsivärähtelymittarin hinta on noin 1500 € - 2000 € [49]. Nämä laitteet ovat kuitenkin pääasiassa tarkoitettu laitteiden yleistärinän valvontaan. Tällöin harvoin saadaan selville kuitenkaan ongelmien juurisyitä. Niiden käyttö on perusteltua, mikäli laitteisto on yksinkertaista, eli esimerkiksi useita värähtelyn aiheuttajia, kuten vaihteistoja, ei ole mittauksen piirissä [38, s. 18].

Vaativimpiin mittaushetkiin ja tarkkoihin vikojen analysointiin on suositeltavaa hankkia värähtelytesteri. Näiden hinnat ovat noin 9 000 € - 10 000 € [49, s. 9]. Testerin avulla voidaan kuitenkin saada tarkempia tietoja laitteiden kunnosta, sekä selvittää paremmin varsinainen juurisyys vian aiheuttajalle. On syytä tiedostaa kuitenkin, että testerin antamaa dataa on osattava tulkita oikealla tavalla, jotta mahdollinen hyöty

saavutettaisiin. Tällöin voi tulla tarpeeseen, että yritys järjestää kunnossapitohenkilöstölle koulutusta liittyen värähtelymittauksiin. Koulutusten hinnat vaihtelevat hieman 1 000 € - 2 000 € välillä.

5.2 Sähkötekniset mittaukset

Sähköteknisillä mittauksilla tarkoitetaan kaikkien sähkönsuureiden (jännite, virta, varaus, näennäisteho, pätöteho, loisteho, resistanssi, konduktanssi, kapasitanssi ja induktanssi) sekä elektromagneettisten ilmiöiden mittaamista. Valvomalla käytön aikana tapahtuvia muutoksia voidaan päätellä laitteiston kunnosta tiettyjä asioita. Sähkötekniisiä mittauksia voidaan käyttää esimerkiksi:

- Sähkökoneiden
- Sähkökaappien
- Syöttöverkon
- Antureiden
- Johtojen ja liittimien kunnonvalvonnassa

Käyttökohteita on valtavasti teollisuudessa. Tärkeää on löytää oikeat mittaussuureet ja menetelmät, jotta aineistosta voidaan tehdä oikeanlaisia johtopäätöksiä laitteiston kunnosta.

Tärkein hankinta yleiseen kunnonvalvontaan sähkötekniisiä mittauksia varten on yleismittari. Sen avulla voidaan mitata hyvin kattavasti eri sähkösuureita. Lisäksi laitteesta riippuen, niihin on tarjolla lisäantureita, joilla mittauskapasiteettia voidaan laajentaa. Kuitenkin haluttaessa mitata tarkemmin sähkötekniisiä asioita, on syytä hankkia oskilloskooppi. Oskilloskoopin avulla datan analysointi on huomattavasti laajempaa, jolloin mahdollisia vikatilanteita voi paljastua herkemmin.

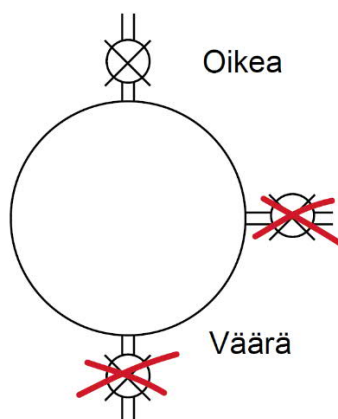
Yleismittariin tai muuhun vastaavaan signaalianalysaattoriin kiinnitettävä virtapihtianturi on hyödyllinen, kun tarkoituksena on tarkastella esimerkiksi sähkökoneita. Virtapihtianturilla saadaan suoritettua esimerkiksi virta-analyysi, jonka pohjalta voidaan tehdä päätelmiä moottorin kunnosta. Virta-analyysin käytöstä oikosulkumoottorille ja sen analysoinnista on kerrottu tarkemmin kappaleessa 4.4.1.4.

Elektromagneettisiamittauksia varten yrityksellä on oltava anturi, joka reagoi magneettikentän muutoksiin. Tällaisia antureita ovat esimerkiksi induktioanturit. Oikosulkumoottorille tehtävistä mittauksista on kerrottu tarkemmin kappaleessa 4.4.1.2.

Hinnaltaan mittalaitteet eivät ole kovin suuria, mutta niiden oikeaoppinen käyttäminen voi olla haastavaa. Oikean mittaustaikaa ja saadun mittaustuloksen analysointi edellyttää vähintään perussähkötekniikan tuntemista.

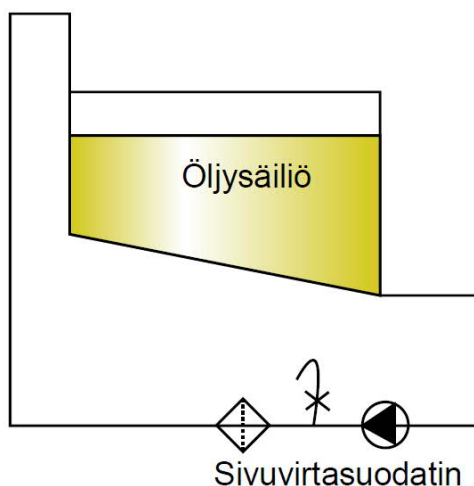
5.3 Hydrauliiikkanesteanalyysi

Hydrauliiikkanesteanalyysiä varten tarvitsee järjestelmästä ottaa näyte analysointia varten. Näytteen ottamiseen on kiinnitettävä suurta huomiota, sillä virheellinen näytteenottotapa vääristää saatuja tuloksia. Tärkeintä on ottaa näyte aina samalla tavalla samasta kohtaa, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia. Kuva 68 näyttää näytteenottohanan oikean sijoituspaikan putkessa.



Kuva 68. Näytteenottohanojen sijoittaminen oikein putkeen [20, s. 4]

Kun näytteenottohana sijoitetaan putken yläpuolelle, varmistetaan, että hanaan ei kerry ylimääräisiä hiukkasia käytössä. Paras tapa olisi sijoittaa näytteenottohana sivuvirtauspiiriin suodattimen ja pumpun välille. Tällöin näytteenottopaikka sijaitsee piirin saastuneimmassa kohdassa, jolloin saadaan likaisin mahdollinen näyte [20, s. 4]. Kuva 69 esittää parhaan mahdollisen tavan näytteenottopaikan sijoittamiselle.



Kuva 69. Näytteenottohanan sijoitus sivuvirtapiirissä [20, s. 5]

Mikäli sivuvirtasuodatinta ei ole olemassa, näytteen ottaminen voidaan tehdä myös erillisellä tyhjiöpumpulla. Tällöin näyte pitäisi ottaa tankin alimmasta kohdasta noin 10 cm korkeudelta.

Nestenäytteen ottaminen pitäisi tapahtua aina samalla tavalla. Ensin nestettä valutetaan näytteenottohanasta noin puolilitraa, jotta hana puhdistuu. Tämän jälkeen näytteenottopulloon täytetään nestettä, jonka jälkeen pulloa ravistetaan ja neste kaadetaan pois. Tämä on syytä tehdä muutamaan kertaan, jotta voidaan varmistua, että pullo on hiukkasista puhdistettu. Kun pullo on puhdistettu, siihen voidaan ottaa varsinainen näyte.

Itse öljyanalyysissä pitäisi ilmetä vähintäänkin hiukkasten lukumäärä, vesipitoisuus, viskositeetti ja happoisuus. Tällöin saadaan kattava kuva öljyn sen hetkisestä kunnosta. Analyysit toteutetaan monesti ulkoistetuissa laboratorioissa, jotka ovat erikoistuneet nesteanalyysien suorittamiseen. Tällöin yritykselle ei aiheudu suuria kustannuksia työkaluinvestointien osalta, pelkästään oikeat näytteenottovälineet riittävät. Suositeltava aikaväli analyysille on noin kuusi kuukautta, tämä kuitenkin vaihtelee paljon käyttöolosuhteista riippuen [20, s. 8].

5.3.1 Hydrauliikkanesteen jatkuva valvonta

Järjestelmässä käytettävän nesteen kunnonvalvontaan on olemassa myös paljon erilaisia antureita, jotka mittaavat eri suureita öljystä. Eräs kattava anturi on Tan Deltan tarjoama OQSx anturi. Anturi valvoo nesteen lämpötilaa ja sen kuntoa muun muassa partikkeli- ja vesipitoisuuden sekä viskositeetin avulla. Nesteen kunnosta ja sen vaihtelunopeudesta muodostetaan numeerinen arvo, joka kuvastaa nesteen sen hetkistä tilaa suhteessa uuteen. Anturi vaatii kuitenkin jonkin signaalinkäsittelijän, joka muodostaa käyttöliittymän käyttäjän ja anturin välille. Toisaalta sitä voidaan käyttää myös lähettämään dataa pilveen, josta tieto on kunnossapitohenkilöstön käytettävissä [50].

On olemassa myös antureita, jotka ovat erikoistuneet mittaamaan vain tiettyä öljyn ominaisuutta. Tärkeimpinä mitattavina ominaisuuksina ovat öljyn vierasainepitoisuudet ja lämpötila. Antureiden sijoittaminen linjastoon kannattaa suunnitella tarkkaan. Tärkeää on, että anturin sijaitsee kohdassa, jossa neste on virtaavaa. Antureiden hinnat ja varsinkin niiden tarvitsemat oheislaitteistot ovat yksi rajoittavatekijä niiden hankinnassa.

5.4 Käyttäjäpohjainen vikatilaseuranta ja aistinvaraiset mittaukset

Yksi halvimmista ja eniten käytetyistä menetelmistä laitteiden kunnonvalvonnassa ovat aistinvaraiset mittaukset. Ihmisaistien monipuolisuus laajentaa niiden käyttöalueen todella kattavaksi. Aistinvaraisesti voidaan valvoa esimerkiksi:

- Lämpötilamuutoksia
- Tärinöitä
- Laakeriääniä
- Vuotoja
- Paloturvallisuutta
- Ohjelmistojen toimintaa

Aistinvaraisten mittausten luotettavuus vaihtelee kuitenkin käyttökohteesta ja mittaajasta riippuen. Koska aistimittaukset ovat aina subjektiivisia, niiden toistettavuus kasvavien mittahäiriötekijöiden vuoksi on vähäistä. Tämän vuoksi tarkkaa seuranta ja kalliiden laitteiden valvontaa ei pitäisi jättää pelkästään aistinvaraisten mittausten varaan [1, s. 418-421].

Aistinvaraisia mittauksia on hyvä käyttää sähköisten mittausten apuna. Varsinkin koneiden käyttäjät saattavat tunnistaa laitteiden vikaantumisominaisuuksia jo erittäin hyvissä ajoin. Tämä kuitenkin edellyttää pitkää käyttökokemusta ja laitteiston hyvää tuntemusta. Tärkeää on myös, että vikatapaukset tunnistetaan oikein ja ne raportoidaan, jotta niistä voisi tehdä johtopäätöksiä ja suunnitelmia kunnossapitoa varten.

Vikatilojen seurannan raporttiin on syytä kirjata ainakin kuvaus vikatilanteesta, minkälaisessa tilanteessa vika ilmeni, päivämäärä ja laitteiston käyttötunnit. Kun nämä tiedot kirjataan yhteiseen seurantaraporttiin, voidaan niiden pohjalta tehdä päätelmiä laitteiston kunnosta ja mahdollisesta tehdä päätöksiä tulevista kunnossapitotoimista. Tämä kuitenkin edellyttää pitkäaikaista seuranta, jotta siitä olisi apua ennakoivaa kunnossapitoa ajatellen [1, s. 418].

5.5 Suorituskykymittaukset

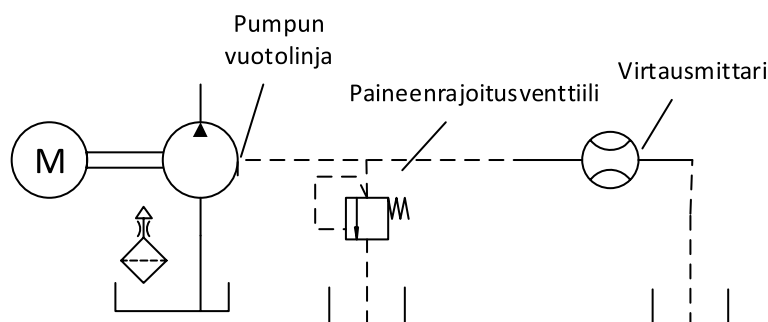
Suorituskykymittauksissa on tarkoituksena mitata erilaisten suureiden avulla komponentin toimintakykyä verrattuna vastaavaan uuteen. Mitattava suure on

riippuvainen tarkasteltavasta komponentista. Suorituskykymittauksilla voidaan valvoa esimerkiksi:

- Hydraulipumppuja/ -moottoreita
- Kompressoreita
- Lämmönvaihtimia
- Diesel- ja ottomoottoreita
- Venttiileitä

Yleistykseenä voidaan sanoa, että monien mekaanisten laitteiden kuntoa voidaan valvoa suorituskykymittauksilla. Sähkökoneiden suorituskykymittaukset eivät ole kovin käytännöllisiä, muuta kuin käyttöönotettaessa laitetta, sillä koneen kunto indikoituu paremmin muilla keinoilla.

Suorituskykymittausten käyttäminen ennakoivassa kunnossapidossa voi joissain tapauksissa olla perusteltua, mutta mittaukset yleensä vaativat joko laitteiston pysäyttämisen tai muutoin erillisen mittaustapahtuman järjestämisen. Mittaustapa voi olla perusteltua esimerkiksi, jos halutaan mitata vakio-olosuhteissa toimivan hydraulikkapumpun vuotovirtoja. Tällöin pumpun vuotovirtapiiristä voidaan mitata tilavuusvirta, josta saadaan todennettua pumpun volumetrinen hyötysuhde. Hyötysuhteen määrittelyssä on kuitenkin oltava tarkkana, varsinkin mitattaessa muuttuvatilavuuksista pumppua, koska vuotovirta on lähes vakio paineen pysyessä vakiona, vaikka pumpun tilavuus muuttuisikin [26]. Kuva 70 selventää pumpun vuotovirtauksen mittaamista.



Kuva 70. Pumpun vuotovirtauksen mittaaminen

Pumpun vuotovirtoja mitattaessa on tärkeää, että pumpun valmistajan antamia kotelopaineita ei ylitetä. Virtausmittari saattaa vuotolinjassa aiheuttaa pahimmassa tapauksessa liian suuren vastapaineen, joka nostaa kotelopaineen liian suureksi. Tällöin voidaan vuotolinjassa käyttää paineenrajoitusventtiiliä, joka varmistaa, että kotelopaine ei nouse liian suureksi [51].

Hydraulipumppujen kunto selviää myös yksinkertaisella testillä, jossa mitataan aikaa, joka pumpulta kuluu tietyn neste tilavuuden siirtämiseen esimerkiksi säiliöön. Mikäli kulunut aika on kovin paljon suurempi kuin uuden vastaavan pumpun, voidaan testattavan

pumpun olettaa olevan kulunut. Yleistävien raja-arvojen määrittäminen testille on kuitenkin haastavaa, koska kulutettu aika on riippuvainen monesta tekijästä, kuten nesteen viskositeetista, siirrettävästä tilavuudesta, lämpötilasta, nostokorkeudesta ja pumpun ominaisuuksista. Tämän vuoksi jokaiselle mittauksen piirissä olevalle pumpulle on määritettävä omat raja-arvonsa referenssimittausten avulla [3, s. 57].

5.6 Lämpötilamittaukset

Laitteen epätyypillinen lämpeneminen on yleensä merkki vikaantumisesta. Seuraamalla lämpötilan muutoksia voidaan tehdä päätelmiä laitteen kunnosta. Lämpötilamittauksia käytetään yleisesti teollisuudessa niin kunnonvalvonnassa kuin myös suojaus- ja hälytysjärjestelmissä. Muun muassa lämpöreleellä voidaan katkaista virran syöttö, kun laitteen lämpötila nousee liian korkeaksi [1, s. 439].

Lämpötilamittauksilla voidaan valvoa teollisuudessa esimerkiksi:

- Sähkökoneita
- Sähkökaappien kytkentöjä
- Hydraulipumppuja/ -moottoreita
- Venttiileitä
- Putkistoja
- Vaihteistoja
- Lämmönvaihtimia
- Hydrauliikkanesteitä
- Laakereita
- Paloturvallisuutta

Käyttökohteita lämpötilamittauksille on hyvin paljon, sillä kaikki kappaleet säteilevät lämpöä. Oikeiden mittalaitteiden, -kohteiden ja mittausten oikean suorittamisen avulla voidaan päästä todella hyvään ennakoivaan asemaan tarkasteltaessa laitteiden kuntoa. Tämän vuoksi lämpötilamittausten suorittaminen ennakoivan kunnossapidon avuksi on suositeltavaa.

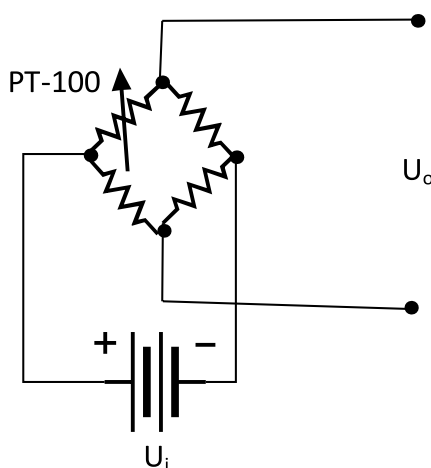
Lämpötilan mittausmenetelmät voidaan jakaa karkeasti koskettaviin ja koskemattomiin mittausmenetelmiin. Koskettavia mittamenetelmiä ovat sähköisiin lämpötila-antureihin, lasilämpömittareihin tai muihin lämpötilaindikaattoreihin perustuvia mittauksia. Sen sijaan koskemattomat lämpötilamittaukset perustuvat infrapunalämpömittareihin ja lämpökameroihin. Molemmilla menetelmillä on puolensa, sillä niiden käyttötarkoitukset ja -kohteet eroavat toisistaan [1, s. 440].

5.6.1 Koskettavat lämpötilamittaukset

Koskettavat lämpötilamittaukset perustuvat teollisuudessa nykyään sähköisiin lämpötilantureihin, kuten metallivastusantureihin ja termopareihin. Aikaisemmin oli yleisempää käyttää erilaisia lämpötilaindikaattoreita, kuten teippejä tai liituja, jotka reagoivat lämpötilan muutoksiin [3, s. 81-82]. Automaation ja sähkökomponenttien hintojen laskun myötä sähköiset anturimittaukset ovat lisääntyneet ja niillä suoritetuilla mittauksilla on mahdollista saavuttaa kattavampaa valvontaa laitteille.

Tyypillisimmät teollisuudessa käytetyt metallivastusanturit ovat Pt-100 tai Pt-1000 tyyppiset anturit. Niiden käyttöä puoltaa niiden standardisoitu toiminta, sillä DIN 43760 standardin mukaan Pt-100 anturin resistanssi on $100\ \Omega$ ja Pt-1000 anturin resistanssi on $1000\ \Omega$ $0\ ^\circ\text{C}$:ssa. Lisäksi niiden resistanssin muutos on lähes täysin lineaarista koko niiden toimintalämpötila-alueella. Näiden antureiden käyttäminen lämpötilamittauksiin perustuu niiden resistanssin muutokseen lämpötilan muuttuessa. Resistanssin muuttuessa myös niiden yli vaikuttava jännite muuttuu [1, s. 440].

Hyvin yleinen anturin kytkentätapa on kytkeä anturi Wheatstonen-siltaan. Siinä neljä vastusta on kytketty siltakytkentään. Wheatstonen-sillasta voidaan korvata yhdestä neljään vastusta antureilla, joiden resistanssi muuttuu mittasuureen muuttuessa. Tällöin esimerkiksi, kun Pt-100 anturin resistanssi muuttuu lämpötilan muuttuessa, ajautuu silta epätasapainoon, joka johtaa potentiaalieron syntymiseen sillan eri päiden välille. Tasapainotilanteessa ulostuleva jännite on $0\ \text{V}$ [1, s. 468]. Kuva 71 esittää Wheatstonen-siltaan kytketyn Pt-100 anturin kytkennän.



Kuva 71. Wheatstonen-siltaan kytketty PT-100 lämpötila-anturi

Sillan yli oleva jännite, eli potentiaaliero U_o , kuvastaa sillan epätasapainoa. Mittaus voidaan suorittaa joko jännite- tai virtamittauksena.

Koskettavia lämpötilamittauksia voidaan käyttää, kun tieto halutaan saada sähköisessä muodossa ja sillä halutaan ohjata säätimen kautta jotain laitetta tai prosessia. Niiden etuna

ovat muun muassa antureiden halpuus ja mittatarkkuus. Toisaalta ne tarvitsevat aina jonkin signaalinkäsittelijän ja niiden asentaminen saattaa olla haastavaa tai jopa mahdotonta. Lisäksi niiden tuottama mittasignaali kuvastaa vain tietyn pisteen lämpötilaa.

5.6.2 Koskemattomat lämpötilamittaukset

Koskemattomat lämpötilamittaukset perustuvat lämpösäteilyn mittaamiseen. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jota ihmissilmin on mahdoton havaita, sillä sen aallonpituus on pidempää kuin näkyvällä valolla. Kaikki kappaleet (joiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen) säteilevät sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on riippuvainen kappaleen lämpötilasta. Kappaleen pintarakenne vaikuttaa hyvin paljon siihen, kuinka paljon sen lähettämästä säteilystä on sen itsensä lähettämää, eli emittoimaa. Emissiokertoimen huomioiminen onkin yksi tärkeimmistä tekijöistä, kun suoritetaan koskemattomia lämpötilamittauksia. Mitä suurempi emissiokerroin, sitä enemmän säteilystä on sen itsensä lähettämää [1, s. 443-445].

Kun koskemattomia lämpötilamittauksia aloitetaan tekemään, on tärkeää tiedostaa mittaustuloksiin vaikuttavat tekijät. Muussa tapauksessa saadut mittaustulokset, saattavat vääristää totuutta ja antaa virrehälytyksiä. Tärkeimmät huomioitavat tekijät ovat materiaalien [35, s. 26-29]:

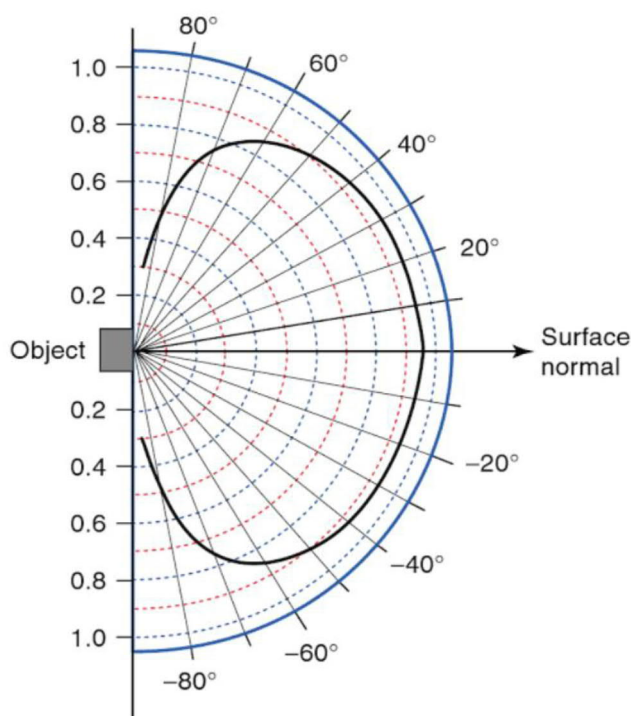
- Lämmönjohtavuuskyky
- Emissiivisyyskerroin
- Heijastukset ympäristöstä
- Ympäröivät sääolot
- Muut ulkoiset lämmönlähteet tai varjostukset

Emissiivisyyskerroin on käyttäjän itse määritettävä, kun mittauksia suoritetaan. Sen tarkka määrittäminen saattaa olla hankalaa, sillä se on riippuvainen useasta eri tekijästä. Muun muassa seuraavat tekijät vaikuttavat kappaleen emissiivisyyskertoimeen [52, s. 35]:

- Materiaali
- Pinnan karheus
- Geometriset muodot
- Kuvauskulma
- Aallonpituus
- Lämpötila

Esimerkiksi tarkasteltaessa valurautarunkoista oikosulkumoottoria, materiaalin emissiivisyyskerroin 100 °C on 0,64 (*Liite D: Pintojen emissiivisyyskertoimia [53]*). Kertoimeen on kuitenkin huomioitava vielä moottorin rungon karheus, käsittely

(esimerkiksi maalaus), pinnan muoto (esimerkiksi jäähdysrivat), kuvauskulma ja lämpötila. Yleistävä suositus on, että kuvauskulma ei ylittäisi yli 60° , sillä tämän jälkeen emissiivisyys laskee huomattavasti. Kuvauskulman vaikutuksen voi nähdä alla olevasta kuvasta (Kuva 72).



Kuva 72. Kuvauskulman vaikutus emissiivisyyteen [52, s. 39]

Emissiivisyyskertoimen määrittämisen apuna voidaan käyttää esimerkiksi mustaa teippiä, maalia tai erillistä koskettavaa lämpömittaria. Teipin ja maalin käytön tarkoituksena on niiden tunnettu emissiivisyyskerroin. Koskettavan lämpömittarin avulla voidaan kalibroida lämpökuvaus vastaamaan oikeaa lämpötilaa useasta eri pisteestä [52, s. 46].

Valittaessa koskemattomaan lämpötilamittaukseen soveltuvaa työkalua, on syytä tiedostaa kameran käyttökohteet. Mikäli riittää, että saadaan vain yhdestä pisteestä lämpötila, voi työkaluksi riittää pelkkä infrapunälämpömittari. Mikäli tarve on saada nopeasti yleiskuva laitteistosta, on syytä hankkia lämpökamera. Lämpökameroissakin on eroja, kuten niiden kuvan resoluutio, herkkyys tai toiminnallisuudet.

6. KUNNONVALVONTAMENETELMIEN VALINTA

Tarkasteltavan laitteen kunnonvalvontakohteet kartoitettiin alkuun riskiarvioanalyysin avulla. Analyysin pohjana käytettiin jo ennalta luotua järjestelmää, jonka avulla eri komponentit pisteytettiin ja niiden kriittisyys selvitettiin. Analyysissä huomioitiin seuraavia tekijöitä [54]:

- Hinta
- Saatavuus
- Vikaantumisen vakavuus prosessille
- Huollettavuus
- Kunnan seurattavuus
- Vikaantumisen aiheuttava turvallisuusriski
- Puhtaustason vaikutus vikaantumiseen
- Vikaantumistodennäköisyys
- Käyttötuntien vaikutus toimintakykyyn
- Käyttökapasiteetin lisäyksen vaikutus toimintakykyyn

Tarkoituksena oli löytää kriittisimmät komponentit, joiden kuntoa olisi syytä jollain tasolla valvoa. Analyysissä hydraulikkajärjestelmän osalta nousi esille hydraulikkapumput, sähkömoottorit, proportionaaliventtiilit sekä turbiinivirtausmittarit. Lisäksi laitteiston käyttäjien haastattelujen perusteella kriittisiksi komponenteiksi nousi myös vaihdelaatikko, hydraulikkaneite sekä voiteluöljy. Seuraavissa alakappaleissa on esitetty toimintamalli, jonka avulla komponentin kuntoa olisi järkevä seurata.

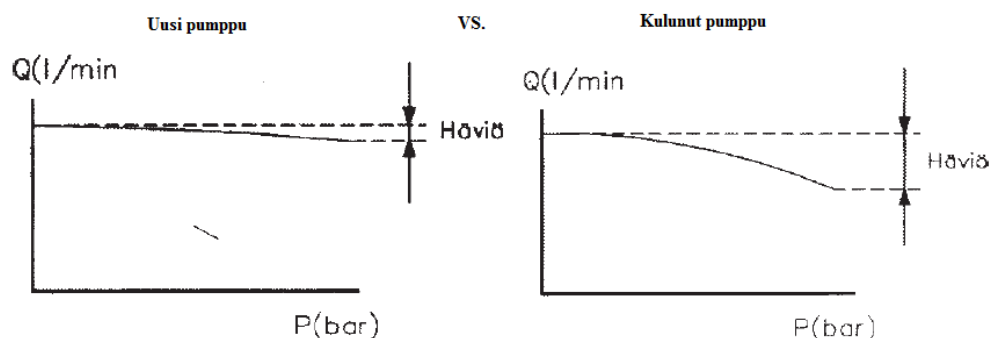
6.1 Hydraulipumppujen valvonta

Laitteistosta löytyy neljä hydraulikkajärjestelmän pumppua sekä kaksi voitelujärjestelmän pumppua. Koska tällä hetkellä ei ole olemassa tiedonkeruujärjestelmää, jonne kaiken mitatun datan voisi tallentaa analysointia varten, ei alkuun kannata lähteä anturoimalla seuraamaan pumppujen kuntoa.

Pumppujen kunnan indikoimiseen paras tapa on selvittää niiden volumetrinen hyötysuhde. Tämä tapahtuu esimerkiksi seuraavalla testillä:

1. Pidetään pumpulta vaadittu tilavuusvirtaus vakiona, esimerkiksi suurimpana tilavuusvirtauksena
2. Mitataan pumpun tuottama tilavuusvirtaus, kun kuormitustaso on 0 bar
3. Nostetaan kuormitustasoa esimerkiksi 25% maksimi painetasosta ja mitataan pumpun tuottama tilavuusvirtaus

4. Jatketaan painetason nostoa askelmaisesti kohti maksimipainetasoa. Mitataan pumpun tuottama tilavuusvirtaus jokaisella painetasolla
5. Piirretään kuvaaja alla olevan kuvan (Kuva 73) tavalla, jossa näkyy pumpun tuottaman tilavuusvirtauksen suhde painetasoon.



Kuva 73. Hydraulikkapumpun volumetrinen hyötysuhteen määrittäminen [55, s. 12]

6. Mikäli pumpun tuottama tilavuusvirtaus laskee jyrkästi painetason noustessa, on pumpun volumetrinen hyötysuhde huono. Tämä tarkoittaa, että pumpu on todennäköisesti kulunut

Toinen vaihtoehto pumpun volumetrinen hyötysuhteen mittaamiselle on mitata pumpun vuotolinjan tilavuusvirtausta. Tilavuusvirtausta voidaan mitata esimerkiksi ultraäänivirtausmittarilla, jolloin putkistoon ei tarvitse tehdä mitään muutoksia. Tämä edellyttää kuitenkin tarvittavan mittarin hankkimista. Ultraäänivirtausmittareita tarjoaa esimerkiksi Katronic.

Pumppujen kuntoa voidaan seurata myös värähtelymittauksilla. Niiden avulla selviää muun muassa pumppujen laakereiden kunto, sekä mahdolliset kavitaatiotilanteet. Kavitaatiota voidaan seurata myös aistinvaraisesti kuuntelemalla. Mikäli kavitaatiota esiintyy, voi aiheuttajana olla myös suunnitteluvirhe, joka on korjattava mahdollisimman nopeasti.

6.2 Sähkömoottoreiden valvonta

Sähkömoottoreiden kunnonvalvonnassa kattava tapa on mitata moottorin lämpötilamuutoksia. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi lämpökameralla. Lämpökameran avulla saadaan selville esimerkiksi mahdolliset syöttölinjojen liitinviat, laakeriviit ja käämitysviit.

Koska suurin osa sähkömoottoreiden vioista aiheutuu laakereista, kannattaa niiden kuntoon kiinnittää erityisesti huomiota. Laakereiden kunnonvalvontaan paras tapa on suorittaa värähtelymittauksiin perustuvia mittauksia. Esimerkiksi SPM:n avulla saadaan jo hyvin varhaisessa vaiheessa selville laakerin vikaantuminen. Lisäksi sillä voidaan

nähdä laakerin voitelutilanne. Kannettavia värähtelymittareita tarjoaa esimerkiksi SPM Instrument.

6.3 Antureiden ja venttiilien valvonta

Antureiden kuntoon ei ole syytä kiinnittää suurempaa huomiota, koska ne kuuluvat vuosittaisen kalibroinnin piiriin. Tällöin joka vuosi varmistetaan, niiden oikeanlainen toiminta. Mikäli, jokin anturi ei ole kalibroitavissa oikealle toiminta-alueelle, se on syytä vaihtaa uuteen.

Venttiileiden ennakoivaan kunnonvalvontaan ei ole myöskään syytä ruveta, sillä niiden tarkan kunnon määrittäminen purkamatta ja laitteiston toimintaa pysäyttämättä on haastavaa. Niiden kuntoa voidaan kuitenkin valvoa tehtävien lämpökameramittausten yhteydessä. Mikäli huomataan, että jokin venttiili lämpenee huomattavan paljon, on se syytä ottaa tarkempaan tarkasteluun.

6.4 Vaihteiston valvonta

Vaihteiston kunnonvalvonta on koettu tärkeäksi laitteiston käyttäjien keskuudessa. Tämä johtuu vaihteiston kriittisyydestä laitteistossa. Paras tapa valvoa vaihteiston kuntoa, on suorittaa sille värähtelymittauksia. Niiden avulla on mahdollista saada selville sekä laakeriston että hammaskosketuksen viat. Myös lämpökameralla suoritettut mittaukset kuvastavat mahdollisia vikatilanteita.

Vaihteiston öljyanalyysi kuvastaa myös vaihteiston kuntoa. Mikäli öljystä löytyy huomattava määrä partikkeleita, voidaan epäillä vaihteiston kuluneen.

6.5 Hydrauliikkanesteen ja voiteluöljyn valvonta

Hydrauliikkanesteen kunnonseurannan avulla on mahdollista saada selville kattava tilanne koko järjestelmästä. Komponenttien kulumishiukkaset kulkeutuvat hydrauliikkanesteen mukana, jolloin nesteanalyysin avulla voidaan havaita, minkä tyyppistä kulumista laitteistossa on tapahtunut.

Tällä hetkellä nesteelle suoritetaan vesipitoisuusanalyysi aina testikappaletta vaihdettaessa. Lisäksi neste vaihdetaan aina vuosittain. On silti syytä suorittaa vähintään vuosittain nesteanalyysi, jotta mahdolliset kulumistapaukset tulisivat ilmi. Analyyseja tarjoaa esimerkiksi Fluidlab.

Suosittelava analyysiväli on korkeintaan yksi vuosi. Vuosittain olisi syytä tehdä vähintään esimerkiksi Fluidlabin tarjoama perusanalyysi (*Liite E: Öljyanalyysi FluidLab [57]*), johon sisältyy muun muassa viskositeetin, ulkonäön, kulumametallien, puhtausluokituksen sekä vesipitoisuuden määrittäminen.

6.6 Kunnonvalvonnan jatkokehittäminen

Tulevaisuudessa olisi syytä keskittyä kunnonvalvonnan automatisointiin. Tämä tarkoittaa erilaisten antureiden liittämistä järjestelmiin ja niiden mittaaman datan siirtämistä pilvipalveluihin. Muun muassa komponenttien lämpötiloista voidaan saada ajantasaista tietoa antureilla. Tiedon avulla voidaan tehdä trendiseurantaa ja tehdä päätelmiä laitteiston kunnosta. Lisäksi tietoa voidaan kerätä myös värähtelymittauksilla. Pilvipalveluun voitaisiin liittää automaattinen hälytysjärjestelmä, joka ilmoittaa, mikäli asetetut raja-arvot ylitettäisiin. Myös hydraulikkaneesten kunnonseuranta voidaan automatisoida antureilla. Tällöin voidaan ajoittaa oikea hydraulikkaneesten vaihtaminen ja välttää nesteiden turha vaihtaminen.

Tärkein asia jatkokehittämisessä on kuitenkin keskittyä toimivan kunnossapitojärjestelmän luomiseen. Järjestelmässä olisi syytä näkyä laitekohtaisesti vähintään:

- Suunniteltu huolto-ohjelma
- Suoritetut huollot
- Kaikki havaitut huomiot ja vikatilanteet sidottuna käyttötunteihin ja päivämäärään
- Ennakoivan kunnossapidon suorittamat mittaukset
- Käyttöaste
- Vikaantumisaste
- Käyttötunnit
- Ennuste tulevista huolloista käyttötuntien ja mitatun datan perusteella

Järjestelmän olisi syytä olla riittävän helppokäyttöinen, jotta sen käyttämiseksi ei nouse liian suurta kynnystä. Tämä tarkoittaa sitä, että käyttäjien ei tarvitse nähdä erillistä vaivaa järjestelmän ylläpitämiseksi. Esimerkiksi järjestelmän mobiilikäytettävyys madaltaa kynnystä käyttää järjestelmää.

Mobiilikäyttöä varten laitteistojen huoltojen ylöskirjauksen apuna voi olla esimerkiksi laitekohtaiset QR-koodit. QR-koodin avulla mobiililaitte tunnistaa laitteen, näyttää laitteen huoltohistorian ja antaa mahdollisuuden kirjata tehdyt huollot ja havainnot. Tämä nopeuttaa ja helpottaa kunnossapitohenkilöstön työtä.

Mobiililaitteisiin on myös saatavilla lämpökameroita, jotka nopeuttavat vikojen paikantamista. Tällä hetkellä vartenotettavinta vaihtoehtoa lämpökameratoiminnolle mobiililaitteessa tarjoaa FLIR. FLIR One -sarjan tuotteet liitetään mobiililaitteen usb-liitäntään, jonka kautta ne välittävät lämpökamerakuvaa suoraan mobiililaitteen näytölle [56].

Koska laitteisto koostuu monesta erillisestä osajärjestelmästä, olisi syytä kerätä käyttötunteja usealta toimilaitteelta. Tällä hetkellä käyttötuntien määrä näkyy vain vaihteistolta. Tämä ei kuitenkaan kerro laitteiston todellista käyttöastetta tai käyttötunteja, sillä vaihteisto ei ole käytössä kuin osassa laitteella tehtävistä toiminnoista. Syytä olisi ainakin kiinnittää matalapainejärjestelmän pumpun käyttötunteihin, koska se on käytössä suurimmassa osassa toiminnoista. Tällöin saataisiin kattavampi kuva todellisista käyttötunneista sekä käyttöasteesta. Käyttötuntien mittaus voi tapahtua esimerkiksi pumppua ohjaavalta taajuusmuuttajalta.

6.7 Muiden laitteiden liittäminen kunnonvalvonnan piiriin

Laitetason kriittisyystarkastelun avulla voidaan saada lähtökohta kunnonvalvontasuunnitelman tekemiselle. Kriittisyystarkastelun avulla voidaan selvittää mille laitteille kunnonvalvontaan liittyviä mittauksia olisi syytä kohdentaa. Laitetason kriittisyystarkastelu suoritettiin kriittisyyskartoitustaulukon avulla (*Liite F: Laitetason kriittisyystarkastelutaulukko*). Taulukon avulla laskettiin laitteille kriittisyysarvo, mitä suurempi arvo, sitä kriittisempi laite on. Kriittisyysarvo laskettiin Kaavalla 17 [1, s. 148].

$$K_i = K_{vv}(30K_{tu} + 20K_{ym} + 50K_{tm} + 30K_{la} + 20K_{ko} + 50K_{ka}) \quad (17)$$

jossa K_i = Kriittisyysarvo/-indeksi

K_{vv} = Painotuskerroin vikaantumisvälille

K_{tu} = Painotuskerroin turvallisuusriskeille

K_{ym} = Painotuskerroin ympäristöriskeille

K_{tm} = Painotuskerroin tuotannon menetyksille

K_{la} = Painotuskerroin laatuksannuksille

K_{ko} = Painotuskerroin keskimääräisille korjauskustannuksille

K_{ka} = Painotuskerroin käyttöasteelle

Kriittisyysarvo tarkastelussa painotettiin erityisesti laitteiden käyttöasteen ja tuotannon menetyksen merkitystä. Korjauskustannusten ja ympäristöriskien painotus oli kaikista vähäisintä. Alla olevaan Taulukkoon 12 on laskettu muutamien laitteiden kriittisyysarvoja.

Taulukko 12. Kriittisyysarvoja muutamille laitteille

Kriittisyysarvo	Laite	Selite
2480	Laite 1	Laite kohtuullisen uusi, vikaantumisväli vielä pieni, käyttöpaine kohtuullisen suuri ja laitteessa pyöriviä akseleita
1860	Laite 2	Laitteistossa suuri käyttöpaine ja pyöriviä akseleita, vikaantumisväli melko pieni
1770	Laite 3	Suuri käyttöaste, vikaantumisväli melko pieni
1560	Laite 4	Käyttöaste melko suuri, pieni turvallisuusriski ja ympäristöriski
1320	Laite 5	Vikaantumisväli melko pieni, käyttöaste melko suuri
1200	Laite 6	Pieni käyttöaste, pysäyttää tuotannon noin 2 päiväksi rikkoutuessaan
1140	Laite 7	Pitkähkö vikaantumisväli, turvallisuusriski kohtuullisen suuri rikkoutuessa
1080	Laite 8	Pitkähkö vikaantumisväli, pieni käyttöaste ja pienet korjauskustannukset
660	Laite 9	Pitkähkö vikaantumisväli, pieni käyttöaste, ei merkittävää turvallisuusriskiä
490	Laite 10	Pitkä vikaantumisväli, merkitys lopputuotteen laadulle ei niin suuri
480	Laite 11	Käyttöaste erittäin vähäinen, pitkä vikaantumisväli, pienet korjauskustannukset

Diplomityössä tarkasteltava laitteisto sai kriittisyysarvon 1860, joten se on melko korkealla kriittisten laitteiden listalla. Kriittisyysarvon ollessa yli 1500, on syytä laitteeseen kohdistaa erityistä huomiota suunniteltaessa kunnonvalvontaa. Alle 1000 kriittisyysarvolla ei laitteeseen kannata suunnata suurta kapasiteettia kunnonvalvonnasta.

Laitetyypit ovat osittain toisiaan vastaavia, joten kunnonvalvontamenetelmien laajentaminen muille laitteille on joiltakin osin suoraviivaista. Tarkasteltavat komponentit saattavat olla eriävät, mutta menetelmien osalta ei suuria muutoksia ole.

6.8 Kunnonvalvonnan suorittaminen ja kustannukset

Kunnonvalvonnan kustannukset yritykselle koostuvat kunnossapito henkilöstön työajasta, työkaluinvestoinneista, sekä mahdollisista tuotannonpysäytyksistä mittausten ja huoltojen ajaksi. Tuotannon pysäytyksiä on syytä välttää mahdollisimman paljon, joten suoritettavien mittausten tulisi ajallisesti olla hyvin lyhyitä tai ne olisi syytä saada sisällytettyä varsinaisen tuotannon yhteyteen.

Ajallisesti yhden laitteen kunnonvalvonta ei ole suuri investointi, mutta kunnonvalvonnan piirissä on yleensä useita laitteita, joten kokonaisuutta ajatellen laitekohtainen kunnonvalvonta-aika olisi oltava mahdollisimman pieni. Tällöin ei ole esimerkiksi järkevää suorittaa useita tunteja vaativia mittaustoimenpiteitä laitekohtaisesti.

Suoritettaessa kuitenkin pääasiassa manuaalisia mittauksia, niiden vaatima aika saattaa varsinkin alkuvaiheessa nousta yllättävän suureksi. Käytetty aika kuitenkin pienenee sitä mukaan, kun mittauksiin tulee rutiinia. Vaihtoehtoisesti kulutettua aikaa voi pienentää lisäämällä automaatiota.

Alla on tehty suuntaa antavia laskelmia, joita ennakoivan kunnossapidon käynnistäminen ja ylläpitäminen sisältävät:

6.8.1 Laiteinvestoinnit

Jotta kunnonvalvonnalla olisi mahdollisuus onnistua, tarvitsee sitä varten hankkia tarpeellisia työkaluja. Alla olevaan taulukkoon (Taulukko 13) on listattu työkaluja/laitteita, sekä niiden suurpiirteinen hinta:

***Taulukko 13.** Työkaluinvestoinnit ennakoivaa kunnossapitoa varten*

Laite	Määrä [kpl]	Kpl hinta [€]	Yht. hinta [€]	Lähde
Värähtelytesteri	1	9383	9383	[58]
Käyttötuntilaskuri	5	19,60	98	[59]
Tabletti/ Mobiililaite	1	169,90	169,90	[60]
Flir ONE/ Lämpökamera	1	249,00	249,00	[61]
Hydraulinesteen näytteenotto välineistö	1	200	200	[62]
Lämpötilatarrat	1	16,23	16,23	[63]
YHTEENSÄ			10 116,13 €	

Näillä laiteinvestoinneilla on mahdollista valvoa lähes kaikkia käytössä olevia tuotantolaitteita. Käyttötuntilaskureiden asentaminen on syytä tehdä vähintään tärkeimmille laitteistoille, jotka laitetaso kriittisyystarkastelussa ilmenivät (ks. Taulukko 12).

Laiteinvestointien lisäksi myös kunnonvalvontajärjestelmään on syytä panostaa. Sen hinnan arvioiminen on haasteellista, koska hinta vaihtelee hyvin paljon yrityksen tarpeista. Lähtökohtana voi toimia esimerkiksi Excel- taulukointi, jolle hintaa ei juuri muodostu. Järjestelmän on kuitenkin oltava niin monipuolinen ja helppokäyttöinen, että sen käyttämisessä ei ole kynnystä. Lisäksi sen liitettävyyden ja käytettävyyden myöhemmässä

vaiheessa vastaamaan kasvavan automaatioasteen kysyntää, on hyvä ottaa jo heti alussa huomioon.

6.8.2 Ajallinen investointi

Ajalliset investoinnit jakautuvat ennakoivan kunnonvalvonta käytännössä kahteen eri tekijään:

- Kunnonvalvonnan aloittamiseen liittyvät kustannukset
- Kunnonvalvonnan ylläpitämiseen liittyvät kustannukset

Aloittamiseen liittyviin ajallisiin kustannuksiin kuuluvat muun muassa tavoitetason asettaminen, järjestelmän suunnittelu, laitetason kriittisyystarkastelu, oikeiden mittasuureiden valinta, automaatioasteen määrittäminen, mittavälineiden hankinta, tarvittavien mittalaitteiden asentaminen sekä mahdolliset koulutukset.

Ylläpitämisen kustannukset muodostuvat mittausten suorittamiseen kulutetusta ajasta, mittaustietojen analysoimiseen käytetystä ajasta, lisäkoulutuksista, tarvittavien huoltotoimenpiteiden suorittamisesta sekä järjestelmän hienosäätämisestä.

Ajallisesti tämä tarkoittaa yritykselle vähintään yhden täysipäiväisen työntekijän palkkaamista kunnossapitovastaavaksi, jolta kuluu noin puolet työajasta ennakoivaan kunnossapitoon liittyvissä asioissa. Tällöin yritykselle koituvia kuluja vuositason tasolla voidaan arvioida tulevan noin 50 000 € (3 000 € / kk + 25% sivukulut ja lomarahat [64]), sisältäen työnantajalle koituvat sivukulut ja mahdolliset koulutukset. Tämä tarkoittaa noin 25 000 € kuluja ennakoivaa kunnossapitoa ajatellen vuositason tasolla.

6.8.3 Kunnonvalvonnan investointien vaikutus yritykselle

Laiteinvestointien kuoletusajaksi voidaan ajatella 5 vuotta, jolloin vuositason hinta jää noin 2 000 €. Laiteinvestointien ja ajallisten investointien yhteiskulukuksi syntyy siis vuositason tasolla noin 27 000 €. Suhteutettuna laitekorjauksiin tämä voisi tarkoittaa esimerkiksi yhden vaihdelaatikon täyskorjausta noin neljän vuoden välein tai lyhyttä tuotantokatkosta vuodessa.

Tuotantokatkosten välttämällä tai lyhentämällä syntyy yritykselle suurimmat säästöt. Kun tuotantolaitteilta vältetään ylimääräiset käyttökätköt, syntyy yritykselle säästöjä sekä tuotteiden valmistumisen osalta että myös työntekijöiden ajankäytön suhteen. Tästä syystä vikaantumisiin varautumalla ja huoltotyöt oikein ajoittamalla on mahdollista saavuttaa mahdollisimman suuret säästöt.

6.8.4 Kunnonvalvonnan käytännön suorittaminen

Käytännössä mittauskierroksia olisi syytä tehdä vähintään kaksi kertaa kolmen kuukauden välein. Mikäli näyttää, että jossakin laitteiston komponentissa ilmenee poikkeavia mittautuloksia, on sen mittaustiheyttä syytä kasvattaa. Kuitenkin niin, että mittauksista saadut hyödyt ovat ajankäytön suhteen kannattavia. Kun riittävä määrä mittauksia on suoritettu, on mahdollista määritellä tarvittavat hälytysrajat. Hälytysrajojen määrittämisessä voi käyttää apuna kappaleessa 4 annettuja komponenttikohtaisia arvoja ja menetelmiä.

Laitteistojen tärkeimpien komponenttien mittauskohdat olisi syytä merkata, jotta mittautulokset olisivat vertailukelpoisia. Tämä koskee muun muassa värähtelymittausten suorittamista vaihdelaatikoille, sähkömoottoreille tai hydraulipumpuille. Tällöin esimerkiksi sähkömoottorin vähintään toisen pään (mieluiten D-pään) laakerille merkattaisiin kolme eri mittapistettä. Näin saadaan kattavaa dataa laakerin todellisesta kunnosta. Värähtelymittauskohtien merkkaminen voi tapahtua esimerkiksi tussin tai muun merkintätavan avulla.

Kaikkien mittausten suorittaminen edellyttää, että laitteisto on toimintalämpöisenä, eli se on ollut käytössä riittävän ajan ennen mittausten suorittamista. Tällöin varmistutaan siitä, että laitteistojen todelliset lämpötilat ja suorituskyyvyt tulevat esille. Tämä on huomioitava muun muassa lämpökamerakuvauksia tehtäessä. Lämpökamerakuvat on syytä ottaa ainakin vaihteiston, sähkömoottoreiden ja pumppujen laakereista. Lisäksi sähkökaappien kuvilla nähdään, mikäli liitoksissa on häiriöitä.

Ajan käytön säästämiseksi tärkeimpien laitteistojen kylkeen on mahdollista liimata lämpötilaa ilmaisevat tarrat. Tällöin voidaan seurata, mikäli jokin komponentti on ylittänyt sille kriittisen lämpötilan. Mikäli näin on käynyt, on syytä kiinnittää suurempaa huomioita kyseiseen komponenttiin ja selvittää mikä ylimääräisen lämmön nousemisen on aiheuttanut. Diplomityön tarkastelussa olevaan laitteistoon ainakin suurimman sähkömoottorin, vaihteiston ja pumppujen laakeripintojen läheisyyteen kannattaa lämpötilatarrat liimata.

Todellisten käyttötuntien seuraaminen on ensiarvoisen tärkeää kunnossapidon kannalta. Tämä mahdollistaa vikatilaseurannan sekä ennusteiden tekemisen huoltotöiden osalta. Mikäli laitteistossa on useita eri komponentteja, joiden käyttötunnit vaihtelevat suuresti, on järkevää seurata vähintään kriittisimpien järjestelmien käyttötunteja. Tämä tarkoittaa tarkasteltavassa laitteistossa ainakin vaihteiston sekä matalapainejärjestelmän käyttötunteja.

Vähintään kerran vuodessa on suoritettava käytettävälle hydrauliiKANesteelle perusteellisempi analyysi. Analyysia varten otetaan näyte pumppupullolla kappaleen 5.3 ohjeiden mukaisesti. Analyysi on syytä tehdä sekä käytettävästä nesteestä että

vaihdelaatikon voiteluöljystä. Tällä tavoin saadaan kattava kuva järjestelmässä tapahtuneesta kulumisesta.

Hydrauliikkanesteen näytteenoton yhteydessä on samalla hyvä tarkistaa hydrauliletkujen kunto. Mikäli jossakin letkussa näkyy kulumaa tai sen asento näyttää virheelliseltä, on letku joko uusittava tai tarkastettava sen reititys. Tällä tavoin voidaan välttyä suurimmasta osasta yllättävistä letkurikoista. Samassa yhteydessä on syytä tarkistaa myös suodattimien kunto. Mikäli suodattimen tukkeumailmaisoin toteaa suodattimen olevan tukossa, se on syytä vaihtaa.

Kunnonvalvontajärjestelmä on luotava niin yksinkertaiseksi, että laitteiston käyttäjien on vaivatonta lisätä/ kirjata ylös heidän tekemiä huomioita. Tämä on mahdollista esimerkiksi mobiililaitteiden tai alkuun perinteisen taulukoinnin avulla. Taulukoinnin huonona puolena on se, että kunnossapitohenkilön on käytävä kirjaamassa huomiota vielä erikseen järjestelmään, jolloin vian kuvaus saattaa jäädä puutteelliseksi tai reagointiaika vikaan saattaa kasvaa liian suureksi.

7. YHTEENVETO

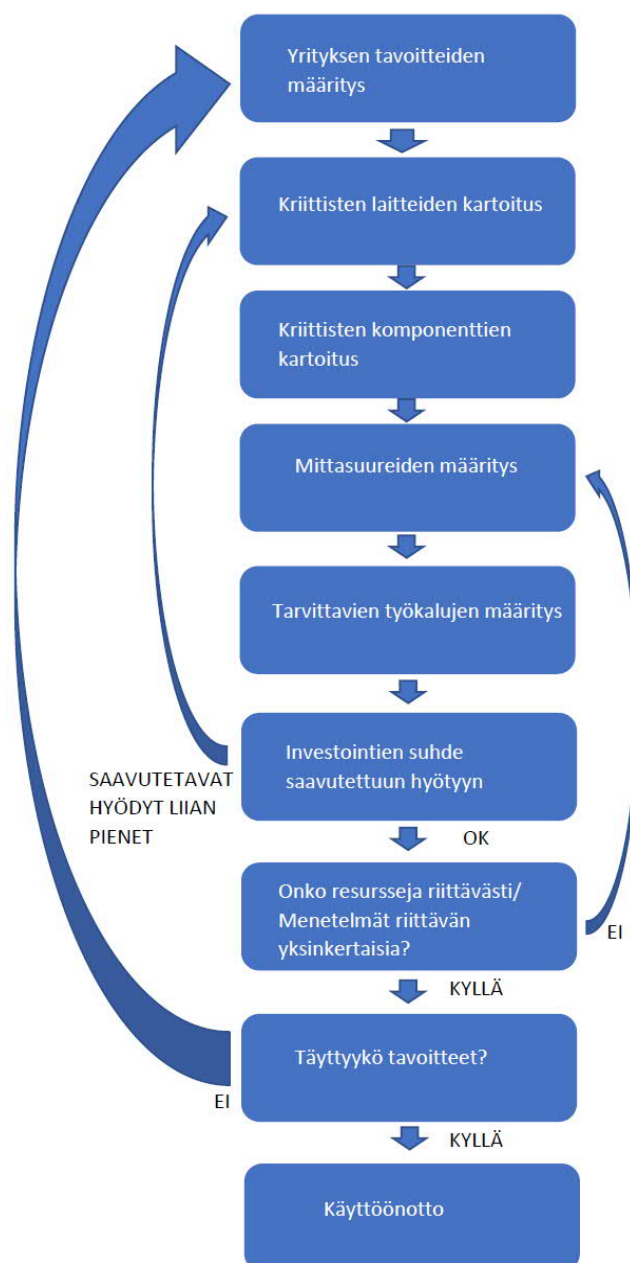
Tärkeä seikka, joka nousi esiin diplomityötä tehdessä, oli ennakoivan kunnossapitoalan kasvava asema monessa teollisuusyrityksessä. Siihen halutaan panostaa, koska tuotantolaitteiden hajoamisen myötä aiheutuvien tuotannonpysäytysten kulujen halutaan laskevan sekä tuotantovarmuuden nousevan. Diplomityön yhteydessä tehdyn tutkimuksen ja alan kirjallisuuden mukaan kuitenkin koulutus alalle on vielä vähäistä. Näiden kahden asian välillä on vielä selvä ristiriita.

Diplomityön tarkoituksena oli kartoittaa ennakoivaa kunnossapitoalaa, sekä löytää keinoja, joilla työssä tarkasteltavana laitteiston kuntoa olisi mahdollista valvoa. Työn tuloksena syntyi esimerkkiehdotus, millä tavoin ennakoivaa kunnonvalvontaa olisi syytä suorittaa laitteelle. Esimerkkiehdotuksen lisäksi diplomityössä on käyty läpi erilaisia mahdollisuuksia kunnonvalvontaa ajatellen. Erilaisten metodien, niiden käyttökohteiden ja ominaisuuksien esittelyn avulla, on mahdollista laatia varsinainen suunnitelma ennakoivaa kunnossapitoa ajatellen.

Diplomityön yhteydessä toteutettiin myös ennakoivaa kunnossapitoalaa koskeva tutkimus, jonka tulokset ovat luettavissa kappaleesta 2.3. Tärkeimpänä tekijänä tutkimuksen suorittamiselle, oli kartoittaa alalla oikeasti vallitsevia käytäntöjä ja tämän avulla luoda viitekehystä varsinaisen diplomityön tekemiselle. Tutkimuksen tuloksista selkeästi nousi esille värähtelymittausten tärkeys sekä niiden monipuolisuus. Tuloksista voidaan nostaa myös esille koulutetun henkilökunnan ja ennakoivan kunnossapidon tärkeys yritykselle.

Työssä käytiin läpi myös erilaisia vikaantumistapoja, jotka ovat tyypillisiä teollisuudessa oleville laitteistoille. Vikaantumistyytit käytiin läpi järjestelmäkohtaisesti, jotka olivat karkeasti jaoteltuna: mekaaniset-, hydraulikka-, pneumatiikka- ja sähköiset sekä ohjelmalliset järjestelmät. Työssä esiteltiin vikaantumistapausten aiheuttajia, niiden esiintymistä, estämistä sekä ennakointia. Vikaantumistapojen lisäksi myös erilaiset työkalut näiden kunnonseurantaa on selvitetty työssä. Työkalujen käyttökohteista sekä valinnasta on annettu tietoa, jotta mahdollisuus valita oikeat työkalut oikeille laitteille on mahdollista.

Yhteenveto varsinaisen ennakoivan kunnossapito-ohjelman suunnittelusta voidaan esittää esimerkiksi alla olevan kuvan (Kuva 74) avulla, jossa on eritelty kunnossapito-ohjelmaan liittyvät pääkohdat sekä vaiheet:



Kuva 74. Ennakoivan kunnossapito-ohjelman päävaiheet

Yllä olevasta kuvasta (Kuva 74) voidaan havaita, että tärkein lähtökohta kunnossapito-ohjelman suunnittelulle on selvittää yrityksen tavoitteet, jotka se haluaa saavuttaa kunnossapidon avulla. Tämän jälkeen alkaa varsinainen suunnitelman laatiminen, jota hienosäättämällä pyritään saavuttamaan kaikki yrityksen asettamat tavoitteet ennen käyttöönottoa.

Tulevaisuuden kannalta tärkeää on ylläpitää ennakoivaa kunnossapitokulttuuria suorittamalla mittaukset niiden vaatimalla tavalla sekä aikataululla. Tämän avulla on mahdollista määritellä tarkemmin raja-arvot, joiden perusteella voidaan päätellä komponenttien olevan elinkaarensa lopussa. Lisäksi on syytä olla myös kärsivällinen saatujen hyötyjen osalta, sillä ennakoiva kunnossapito on satsaus tulevaan, joten kaikki

hyödyt eivät ilmene kerralla vaan pitkällä aikajaksolla. Tulevaisuudessa myös järjestelmän automaatioasteen nostaminen on syytä pitää mielessä. Automaatioasteen nostamisella voidaan saavuttaa entistä parempi seurattavuus ja vikojen havaitsemisaste. Lisäksi sen voidaan olettaa säästävän huomattavan paljon aikaa ja vaivaa. Automaatioasteen nostaminen on syytä pitää mielessä muun muassa tehtäessä laite-, työkalu- tai järjestelmähankintoja. On syytä miettiä investointeja siltä kannalta ovatko ne liitettävissä esimerkiksi muihin järjestelmiin tulevaisuudessa.

LÄHTEET

- [1] Kunnossapitoyhdistys Promaint, Kuntoon perustuva kunnossapito käsikirja, 2009, s. 606
- [2] SKF yhtymä, SKF-laakerien kunnossapito, 2016. Saatavissa:
http://www.skf.com/binary/123-290853/SKF-laakerien-kunnossapito---SKF-bearing-maintenance-handbook---10001_1-FI.pdf
- [3] Safematic Oy, Kunnossapito ja käyttövarmuus, 1985, s. 200
- [4] R. Heinonkoski, Koneautomaation kunnossapito, 2004, s. 207
- [5] Fluid Intelligence, Miksi öljynkuntoa seurataan?, 2017, Saatavissa:
<http://fluidintelligence.fi/en/oljyn-kuntoa-seurataan/>
- [6] R. Parikka & J. Lehtonen, Kulumismekanismit ja niiden merkitys vierintälaakereiden eliniälle, 2000, Saatavissa:
<http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/kulumismekf.pdf>
- [7] Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry. Hitsaustekniikka, 2012, Saatavissa:
http://www.shy-hitsaus.net/portals/shy/iBooklet/2012/HT_1_12/files/assets/basic-html/page1.html
- [8] NTN Global, Bearing Load Calculation, viitattu 6.10.2017, Saatavissa:
http://www.ntnglobal.com/en/products/catalog/pdf/2202E_a04.pdf
- [9] FAG, Rolling Bearing Damage Recognition of damage and bearing inspection, viitattu 9.10.2017, Saatavissa:
http://www.skama.gr/UsersFiles/admin/entypa%20katalogoi/biomixania/wl_82102_3_de_en.pdf
- [10] Barden Precision Bearings, Bearing Failure: Causes and Cures, viitattu 9.10.2017, Saatavissa:
https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/barden/brochure_2/downloads_24/barden_bearing_failures_us_en.pdf
- [11] SKF, Railway technical handbook: Bearing investigation, viitattu 9.10.2017, Saatavissa:
https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_lib

ary/01_publications/barden/brochure_2/downloads_24/barden_bearing_failures_us_en.pdf

- [12] ABB, Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä, viitattu 9.10.2017, Saatavissa: <https://library.e.abb.com/public/4afd9ccbf5eb991fc1256d280083a4d2/Tekninenopasnro5.pdf>
- [13] PSK Standardisointi, Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät, 2007, s. 74
- [14] T. Lindh, On the condition monitoring of induction machines, 2003, s. 146
- [15] SKF Bearing Calculator, viitattu 9.10.2017, Saatavissa: <http://webtools3.skf.com/BearingCalc/selectCalculation.action>
- [16] Laitteiston tekninen käsikirja/ manuaali
- [17] ABB Motors, Oikosulkumoottori räjähdysvaarallisiin tiloihin, manuaali
- [18] Evolution: Business and Technology from SKF, What's normal: The role of temperature in bearing applications, viitattu 9.10.2017, Saatavissa: <http://evolution.skf.com/us/whats-normalthe-role-of-temperature-in-bearing-applications-3/>
- [19] K. Karttaavi & Oppi-Kolmio, Käytännön Hydrauliiikka, 1983, s. 150
- [20] CJC, Clean Oil Guide, 2003, Saatavissa: http://www.teknoma.fi/dev/wp-content/uploads/Clean_Oil_-Guide_FIN.pdf
- [21] PSK Standardisointi, Teollisuusjärjestelmän suunnittelu ja hankinta, 2006, s. 98
- [22] Mobil 1, What are Synthetic Oils?, viitattu 12.10.2017, Saatavissa: <http://www.mobil1.com.sg/academy/what.aspx>
- [23] Promaintlehti, Kuinka pidät voiteluöljyt puhtaina, ilmestynyt 28.3.2014, Saatavissa: [http://promaintlehti.fi/Kunnonvalvonta-ja-kayttovarmuus/Kuinka-pidat-voiteluoljyt-puhtaina/\(offset\)/2](http://promaintlehti.fi/Kunnonvalvonta-ja-kayttovarmuus/Kuinka-pidat-voiteluoljyt-puhtaina/(offset)/2)
- [24] GPM Hydraulic Consulting, Maintenance Hydraulic Troubleshooting, viitattu 12.10.2017, Saatavissa: http://www.gpmhydraulic.com/MHT_Manual.pdf
- [25] Teboil Lubricants, Voiteluaineet tuoteluettelo, viitattu 13.10.2017, Saatavissa: http://www.teboil.fi/Global/Tuotteet/Teboil_tuoteluettelo_2017.pdf
- [26] Hydraulics & Pneumatics, How to Determine Hydraulic Pump Condition Using Volumetric Efficiency, viitattu 13.10.2017, Saatavissa:

<http://www.hydraulicspneumatics.com/blog/how-determine-hydraulic-pump-condition-using-volumetric-efficiency>

- [27] Machinery Lubrication, Determining Hydraulic Pump Condition Using Volumetric Efficiency, viitattu 13.10.2017, Saatavissa:
<http://www.machinerylubrication.com/Read/659/hydraulic-pump-condition>
- [28] A. Ellman, Hydrauliiikan ja koneautomaation mittaukset, viitattu 13.10.2017, Saatavissa:
https://moodle2.tut.fi/pluginfile.php/174659/mod_resource/content/1/IHA-1700_Luentomoniste.pdf
- [29] Festo, Operation conditions and standards in pneumatics, viitattu 13.10.2017, Saatavissa:
https://www.festo.com/rep/be_by/assets/pdf/Druckluftaufbereitung_en.pdf
- [30] Lahden ammattikorkeakoulu, Pneumatiikan luennot, viitattu 16.10.2017, Saatavissa:
http://miniweb.lpt.fi/automaatio/opetus/luennot/pdf_tiedostot/Pneumatiikka.pdf
- [31] G.Gupton, HVAC CONTROLS: Operation and Maintenance, 2002, Saatavissa:
https://books.google.fi/books?id=3nl_e6WEZx4C&printsec=frontcover&hl=fi#v=onepage&q&f=false
- [32] V. Giri et al., IJAREEIE, Health Monitorgin and Fault Diagnosis in Induction Motor – A Review, 2014, Saatavissa:
https://www.ijareeie.com/upload/2014/january/12_Health.pdf
- [33] J. Halme & R. Parikka, VTT, AC-servomoottori – rakenne, vikaantuminen ja havainnointimenetelmät, 2005, Saatavissa:
http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/servomoottori_rakenne_vikaantuminen&havainnointi.pdf
- [34] T. Stjenberg, Kunnossapitokoulu, Lämpökamera kunnossapidon työkaluna, 2000, Saatavissa: <http://heikki.pp.fi/opetus/pedanet/papkem/koulu56.pdf>
- [35] FLIR, Thermal Imaging Guidebook for Industrial Applications, 2011, Saatavissa:
http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264_EN.pdf
- [36] V. Kokko, Condition Monitoring of Squirrel-cage Motors by Axial Magnetic Flux measurements, 2003, Saatavissa:
<http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514269381.pdf>

- [37] ISO 2372 – Vibration Severity, viitattu 17.10.2017, Saatavissa:
<http://www.impactengineering.com/Vibration%20Severity%20-%20ISO%202372%20Chart.pdf>
- [38] P. Nohynek & Lumme, Kunnossapitoyhdisty ry, Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset, 2004, s. 146
- [39] P.Girdhar & C. Scheffer, Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance, 2004, Saatavissa:
https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=tAvTO1t2mwkC&oi=fnd&pg=PP2&dq=predictive+maintenance&ots=aCpQUS-IBr&sig=Z2RekGgDPaaSqaAdYDwotLvDMdU&redir_esc=y#v=onepage&q=predictive%20maintenance&f=false
- [40] ABB, TTT-käsikirja, 2000-07, Saatavissa:
http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/23_Kunnonvalvonta%20ja%20huolto.pdf
- [41] S. Lehtonen, SPM Instrument Oy, Ultra-Long pre-warning time on Low-speed drying drum with HD Technology, 2017, Saatavissa:
https://www.spminstrument.com/Documents/Downloads/Sales%20packages/Chemical/CS_015B_DryingDrum_ChemicalIndustry_FI.pdf
- [42] Electrical4U, Variable Frequency Drive or VFD, viitattu 9.1.2018, Saatavissa:
<https://www.electrical4u.com/variable-frequency-drive/>
- [43] ABB, ACS 600 Hardware Manual, viitattu 24.10.2017, Saatavissa:
https://library.e.abb.com/public/652e2ea7521445bfc1256d2800403b3d/en_601hw_4b_plus_updatenotices.pdf
- [44] ProMaint, Kunnossapidon erikoislehti, 4/2017
- [45] ME Technical Paper, Rolling Element Bearing Analysis, viitattu 1.11.2017, Saatavissa: https://www.asnt.org/temp/graney_jan2012.pdf
- [46] Neste, Diesel, rikitön, Käyttöturvallisuustiedote, viitattu 6.11.2017, Saatavissa:
https://www.neste.fi/static/ktt/13865_fin.pdf
- [47] FLUKE, Fluke 810 vibration tester, Technical Data, viitattu 6.11.2017, Saatavissa:
https://www.yeint.fi/image/data/incomingPdf/FLUKE%20810/810_datasheet_ENG.pdf

- [48] Uusi Teknologia.fi, Kuusiakselinen MEMS-anturi avuksi, 22.2.2016, viitattu 8.11.2017, Saatavissa: <https://www.uusiteknologia.fi/2016/02/22/kuusiakselinen-mems-anturi-avuksi/>
- [49] FLUKE, Yleismittalaitteet ja lisävarusteet hinnasto: 09-10-2017, viitattu 8.11.2017, Saatavissa: <http://content.fluke.com/pdf/ttc-pricelist/finland-fin.pdf>
- [50] TANDELTA, OQS Oil Quality Sensor (OQSx) User Guide
- [51] Hydraulics & Pneumatics, Case Drain Monitoring: Part of a Healthy Recipe to reduce Downtime, viitattu 15.11.2017, Saatavissa: <http://www.hydraulicspneumatics.com/200/TechZone/HydraulicPumpsM/Article/False/13471/TechZone-HydraulicPumpsM>
- [52] M. Vollmer & K.-P. Möllmann, Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, 2010, viitattu 20.11.2017, Saatavissa: https://books.google.fi/books?id=0-Q3DwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [53] FLIR Systems, Emissiivisyystaulukot, 2003, viitattu 20.11.2017, Saatavissa: <https://www.infradex.com/wp-content/uploads/2016/08/emissiivisyys.pdf>
- [54] H. Salminen, Hydraulisen testipenkin riskien arviointi, 2015, diplomityö, s. 64
- [55] FLUID klinikka, Hydrauliiikan mittauksia: Paineen ja tilavuusvirran mittaus, 1994, viitattu 27.11.2017, Saatavissa: <http://www.salhydro.fi/files/PDF/5.hydrauliiikan-mittauksia.pdf>
- [56] FLIR, ONE PRO, tuote-esittely, viitattu 27.11.2017, Saatavissa: <http://www.flir.com/flirone/pro/>
- [57] FluidLab, Öljyanalyysi – Hydrauliiikka, viitattu 29.11.2017, Saatavissa: http://fluidlab.fi/sites/default/files/Fluidlab_öljyanalyysi_hydrauliiikka.pdf
- [58] YEInternational, Fluke 810 värähtelytesteri, viitattu 14.12.2017, Saatavissa: <https://www.yeint.fi/fi/mittaus-ja-testaus/varahtelytesterit/varahtelytesterimoottoritlaakerit>
- [59] ELFA Distrelec, Panasonic käyttötuntilaskuri, viitattu 14.12.2017, Saatavissa: <https://www.elfadistrelec.fi/fi/kaeyttoetuntilaskuri-panasonic-th638cej/p/13754601>

- [60] Verkkokauppa.com, Huawei MediaPad T3, viitattu 14.12.2017, Saatavissa: <https://www.verkkokauppa.com/fi/product/15939/jbrvt/Huawei-MediaPad-T3-10-WiFi-Android-tabletti>
- [61] ELFA Distrelec, FLIR ONE lämpökamera, viitattu 14.12.2017, Saatavissa: https://www.elfadistrelec.fi/fi/laempoekamera-80-60-20-120-flir-flir-one-for-android/p/30020475?channel=b2b&price_afd=249&gclid=EAIaIQobChMI5pre1aqJ2AIVyZQYCh0rHAIUEAAYAIAAEgIR2fD_BwE&gclsrc=aw.ds
- [62] FluidLab, sähköpostitarjous hydraulinesteen näytteenottovälineistä, viitattu 14.12.2017
- [63] ELFA Distrelec, Lämpötilatarrat 71...110 °C, viitattu 14.12.2017, Saatavissa: https://www.elfadistrelec.fi/fi/laempoetilatarra-71-110-pk-10-st-tmc-08sthe/p/17665287?q=*&filter_productFamilyCode=cat-DC-16860&filter_Buyable=1&filter_Category4=Kosteus&filter_Category3=Nesteen+ja+kaasun+mittauslaitteet&page=4&origPos=4&origPageSize=50&simi=99.65
- [64] Palkkaus.fi, Työnantajan sivukulut, viitattu 14.12.2017, Saatavissa: https://www.palkkaus.fi/Cms/Article/tyonantajan_sivukulut

A:

VIERINTÄLAAKERIN

Oire	Laakerin vaurioitunut alue					Tyypilliset aiheuttajat																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
						Asennus			Käyrönalkainen kuorma			Ympäristöolosuhteet				Voitelu																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
						Virheellinen asennus	Lika	Tiukka sovite	Löysä sovite	Puutteellinen entuki	Linjausvirhe	Lian suuri/ pieni kuormitus	Väriähtely	Ylinopeus	Poly/ lika	Vesi	Lämpö	Virran läpilyönti	Väärä voiteluaine	Puutteellinen voitelu	Liallinen voitelu																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Epätavallinen käyttäytyminen	Laakeripesä	Sisäosan kosketuskohdat	Huuli ja kylkiluue	Häkki	Tiiviste																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																

LIITE B: ISO 3448 VG- LUOKITTELU [21, S. 13]

ISO VG-luokka	Viskositeetin keskipiste	Kinemaattisen viskositeetin raja-arvot [mm^2/s] @ 40°C	
		Min	Max
2	2,2	1,98	2,42
3	3,2	2,88	3,52
5	4,6	4,14	5,06
7	6,8	6,12	7,48
10	10	9	11
15	15	13,5	16,5
22	22	19,8	24,2
32	32	28,8	35,2
46	46	41,4	50,6
68	68	61,2	74,8
100	100	90	110
150	150	135	165
220	220	198	242
320	320	288	352
460	460	414	506
680	680	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650
2200	2200	1980	3520 [2420]
3200	3200	2880	3520

LIITE C: ISO 2372 – VÄRÄHTELYLUOKITUKSET [37]

Värähtelyarvo ISO 2372 [mm/s] (RMS)	Luokka 1	Luokka 2	Luokka 3	Luokka 4
	< 20 HP/ 15 kW	20 - 100 HP/ 15kW - 75kW	> 100 HP/ 75kW	>100 HP/ 75kW
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71	B	B	B	B
1,12				
1,80	C	C	C	C
2,80				
4,50	D	D	D	D
7,10				
11,20				
18,00				
28,00				
45,00				
71,00				

LUOKITUS SELITYS

LUOKKA 1	<i>Pienet alle 15kW koneet</i>
LUOKKA 2	<i>Keskisuuret 15kW - 75kW koneet, ilman erikoisalustaa/ Alle 300kW koneet erikoiskiinnityksellä</i>
LUOKKA 3	<i>Suuret koneet, jotka ovat jäykästi kiinnitettyjä alustaan</i>
LUOKKA 4	<i>Suuret koneet, jotka ovat joustavia mittaussuunnassa</i>
A	<i>Hyvä</i>
B	<i>Hyväksyttävä</i>
C	<i>Välttävä</i>
D	<i>Ei hyväksyttävä</i>

LIITE D: PINTOJEN EMISSIIVISYYSKERTOIMIA [53]

Materiaali	Lämpötila [°C]	Aallonpituus [µm]			Emissiivisyys
		2-5	8-14	6,5-20	
Alumiini, eloksoitu, musta/himmeä	70	x			0,67
Alumiini, kiillotettu	50-100	x	x	x	0,04-0,06
Kromi	50	x	x	x	0,1
Kupari, kiillotettu	50-100	x	x	x	0,02
Maali, harmaa tasainen	20	x			0,97
Maali, kromivihreä		x	x	x	0,65-0,7
Maali, musta kiiltävä	20	x			0,92
Muovi, PVC, himmeä	70	x			0,94
Muovi, lasikuitulaminaatti	70	x			0,94
Rauta/Teräs, kiillotettu	100	x	x	x	0,07
Rauta/Teräs, hapettunut	100	x	x	x	0,74
Rauta/Teräs, karkea tasopinta	50	x	x	x	0,95-0,98
Ruostumaton teräs, hieman naarmuuntunut	70	x			0,3
Ruostumaton teräs, kiillotettu		x			0,18
Valurauta, hapettunut	100	x	x	x	0,64
Valurauta, kiillotettu	200	x	x	x	0,21
Valurauta, käsittelemätön	900-1100	x	x	x	0,87-0,95
Voiteluöljy, 0,025mm kalvo	20	x	x	x	0,27
Voiteluöljy, paksu pinnoite	20	x	x	x	0,82

LIITE E: ÖLJYANALYYSI FLUIDLAB [57]



	Öljyanalyysi – Hydraulikka	Analyysipaketit		
		pika - monitorointi	perus	laaja
KUNTO	ulkonäkö	■	■	■
	väri	■	■	■
	viskositeetti (+40 °C)	■	■	■
	viskositeetti – indeksi (sis. viskositeetti +100 °C)	■	■	■
	kokonaishappoluku (TAN)	■	■	■
	ICP – alkuaineanalyysi, lisäaineet: Ca, Mg, Zn, P, Ba, B, S	■	■	■
	FT - IR hapettuminen	■	■	■
KULUMA	ICP – alkuaineanalyysi, kulumametallit: Fe, Cr, Sn, Al, Ni, Cu, Pb, Mo	■	■	■
	membraanisuodatus – mikroskopointi:			
	• kulumametallihiukkasten määrän arvio (normaali, kiihtynyt, epätavallinen kuluminen)	■	■	■
	• kulumametallihiukkasten maksimikoon mittaaminen	■	■	■
PUHTAUS	PQ - indeksi	■	■	■
	hiukkaslaskenta automaattisella hiukkaslaskimella ja puhtausluokitus	■	■	■
	ICP – alkuaineanalyysi, kontaminantit: Si, K, Na	■	■	■
	membraanisuodatus – mikroskopointi:			
	• epäpuhtauksien visuaalinen tarkastelu	■	■	■
	• liukenemattomat	■	■	■
	vesipitoisuus	■	■	■

■ kuuluu pakettiin

■ ei kuulu pakettiin

LIITE F: LAITETASON KRIITTISYYSTARKASTELUTAUUKKO

	Valinta	Painotuskerroin	Selite
Keskimääräinen vikaantumisväli		1	Pitkä vikaantumisväli, yli 5 vuotta
		2	Pitkähkö vikaantumisväli, alle 5 vuotta
		3	Lyhyehkö vikaantumisväli alle 2 vuotta
		4	Lyhyt vikaantumisväli alle 0,5 vuotta

Kerroin #N/A

	Valinta	Painotuskerroin	Selite
Turvallisuusriskit		0	Ei turvallisuusriskiä
		2	Vähäinen turvallisuusriski
		4	Kohtalainen turvallisuusriski
		8	Merkittävä turvallisuusriski
		16	Vakava turvallisuusriski

Kerroin #N/A

Painoarvo 30

	Valinta	Painotuskerroin	Selite
Ympäristöriskit		0	Ei ympäristöriskiä
		2	Vähäinen ympäristöriski
		4	Kohtalainen ympäristöriski
		8	Merkittävä ympäristöriski
		16	Vakava ympäristöriski

Kerroin #N/A

Painoarvo 20

	Valinta	Painotuskerroin	Selite
Tuotannon menetys		0	Laitteen toimimattomuudella ei merkitystä
		1	Laitteen toimimattomuus pysäyttää tuotannon alle puoleksi päiväksi
		2	Laitteen toimimattomuus pysäyttää tuotannon alle päiväksi
		3	Laitteen toimimattomuus pysäyttää tuotannon alle kahdeksi päiväksi
		4	Laitteen toimimattomuus pysäyttää tuotannon useaksi päiväksi

Kerroin #N/A

Painoarvo 50

	Valinta	Painotuskerroin	Selite
Laatukustannus		0	Laitteen toimimattomuus ei vaikuta tuotteiden laatuun
		1	Laitteen toimimattomuus vaikuttaa vähäisesti laatuun
		2	Laitteen toimimattomuus vaikuttaa kohtalaisesti laatuun
		3	Laitteen toimimattomuus vaikuttaa merkittävästi laatuun
		4	Laitteen toimimattomuus vaikuttaa vakavasti laatuun

Kerroin #N/A

Painoarvo 30

	Valinta	Painotuskerroin	Selite
Keskimääräiset korjauskustannukset		0	Korjauskustannuksilla ei merkitystä
		1	Korjauskustannukset alle 2 000 €
		2	Korjauskustannukset alle 5 000€
		3	Korjauskustannukset alle 10 000€
		4	Korjauskustannukset yli 10 000€

Kerroin #N/A

Painoarvo 20

	Valinta	Painotuskerroin	Selite
Käyttöaste		0	Käyttöaste erittäin vähäinen
		1	Käyttöaste alle 25 %, käyttö päivässä alle 2h/ kuukaudessa alle 6pv
		2	Käyttöaste alle 50 %, käyttö päivässä alle 4h/ kuukaudessa alle 12pv
		3	Käyttöaste alle 75 %, käyttö päivässä alle 6h/ kuukaudessa alle 18pv
		4	Käyttöaste yli 75 %, käyttö päivässä yli 6h/kuukaudessa yli 18pv

Kerroin #N/A

Painoarvo 50